

EÖTVÖS LORÁND TUDOMÁNYEGYETEM

TERMÉSZETTUDOMÁNYI KAR

FÖLDRAJZ- ÉS FÖLDTUDOMÁNYI INTÉZET, FÖLDRAJZTUDOMÁNYI KÖZPONT

Környezet- és Tájföldrajzi Tanszék

A művelés elhagyásának hatása a talaj szerves anyagára



ELTE
EÖTVÖS LORÁND
TUDOMÁNYEGYETEM

Dévény Zoltán

OTDK dolgozat

Geográfus MSc

Témavezető: Dr. Jakab Gergely

BUDAPEST, 2023

Tartalomjegyzék

1. Bevezetés.....	4
2. Irodalmi áttekintés	5
2.1. A talaj, mint szénraktár	5
2.2 A talajszén fogalma	5
2.3 A szerves szén megjelenése a talajban	7
2.4 A szerves szén raktározódását befolyásoló tényezők.....	9
2.6 A földhasználatváltozás hatása a talaj szerves széntartalmára	14
2.6.1. A hagyományos talajművelés hatása a talaj szerves széntartalmára	15
2.6.2. A művelt terület visszaalakításának hatása a talaj szerves széntartalmára.....	17
3. Kutatási kérdések	20
4. Anyag és módszer	21
4.1 A kutatási terület	21
4.2 A mintavétel	22
4.4 Az elvégzett mérések	22
4.4.1. Teljes talaj	23
4.4.2. Frakcionált talajminták	23
4.5 Statisztikai számítások	25
5. Eredmények	27
5.1. A talaj alaptulajdonságai	27
5.2. A talajok aggregáltsága, a frakciók szerves anyagának tényezői.....	28
5.3. A talajok szerves anyagösszetétele	31
6. Az eredmények értékelése.....	34
6. Következtetések	38
7. Összegzés	39
8. Köszönetnyilvánítás.....	40
9. Irodalomjegyzék	41

Ábrajegyzék

1. ábra. A legstabilabb talaj szervesanyag (SOM) megjelenési alakok. Bal felül a szerves vegyületek kötődése a talajban található fémekhez (jelen esetben vashoz). Jobb alul pedig az agyagásványok felületéhez megkötődött szerves szénvegyület látható. Forrás: Eldor 2016.....	7
2. ábra. Egy talajdarabka felépítése, a makroaggregátumok között rekedt szerves szénvegyületek megjelenése. Forrás: Chevallier 2011	8
3. ábra. Különböző mérettartományú törmelékes holt szervesanyagok (POM). A talajból elektrosztatikus úton lettek kivonva. Forrás: Lavellee et al. 2020	8
4. ábra. A talaj szerves széntartalmára ható tényezők az összesített hatásukhoz viszonyítva (LUO et al. 2017).	9
5. ábra. A talaj szerves széntartalmának (SOC) alakulása a különböző területhasználatok során, az idő függvényében.	17
6. ábra. A kutatási terület térképe a Google Műhold felvétele alapján. A bal alsó sarokban, a Magyarország ábrán a piros pont jelzi a kutatási terület elhelyezkedését az országon belül...	21
7. ábra. A szemcseméret-elemzés eredményei ábrázolva az USDA talajszerkezeti osztályának meghatározásához.	27
8. ábra. Az egyes területhasználat talajainak aggregáltsága.....	29
9. ábra. Az aggregátumoknak (SA) szerves szén (OC) értékei balra és a C:N jobbra.	30
10. ábra. A 63 µm-nél kisebb (sc) frakció szerves szén (OC) balra és a C:N jobbra.	30
11. ábra. Az finom frakció (sc) és az aggregátumok (SA) OC tartalma [mm ⁻¹ %] és CN aránya.	31
12. ábra. A frakciók szerves anyagösszetétele területhasználatonként százalékos arányban. .	32
13. ábra. A finom frakció (világosszürke) és az aggregátumok (sötét szürke) szervesanyagának tulajdonságai eltérő területhasználat mellett.	32

Táblázatjegyzék

1. táblázat. A talajok általános tulajdonságai területhasználatonként (átlageredmény, szórásokkal).....	28
2. táblázat. A frakciók szerves szén és szén-nitrogén értékei (átlag és szórás).....	30
3. táblázat. A szerves anyag összetételének különbözőségei az egyes területhasználatok között a frakciókon belül és a frakciók között az egyes területhasználatokon belül. Az ANOVA alapfeltevést az adataim felé 95%-os bizonyossággal vizsgáltam.....	33

1. Bevezetés

Napjaink egyik legégetőbb kérdése az éghajlatváltozás és az ehhez kapcsolódó folyamatok kezelése. A probléma kezelésére sokféle megoldást javasolnak, melyek közül az üvegházhatású gázok kivonása a légkörből, majd hosszútávú tárolása az egyik lehetőség. E kezelés többféle úton is megvalósítható. Léteznek mesterséges eljárásokkal dolgozó módszerek és léteznek természetes folyamatokat felhasználó eljárások is. A dolgozatomban az utóbbival fogok foglalkozni. A természetes módszerekről elsősorban az előtömeg növelése, például az erdőtelepítés égett be a köztudatba. Azonban a lehetőségek tárháza jóval nagyobb. A legnagyobb elnyelők, a világtengerek esetében, olyan elgondolások is rég születtek, melyek megoldhatnák a kérdést, azonban ezek további súlyos problémákat vetnek fel (kovamoszatok esete). Viszont a természetes kezelési módszerek hatásait nagyon is érdemes kutatni és alkalmazni, mert kivitelezhető megoldást kínálhatnának a legégetőbb környezeti válságra.

Dolgozatom témája egy ilyen természetes kezelési lehetőséget dolgoz fel: a művelt területek felhagyásával járó szénelnyelő-képesség kihasználását. Ez egy megosztó téma a szakirodalomban, vita van a módszer hatásosságáról. A mai napig állnak fent tisztázatlan kérdések, mint hogy mely éghajlaton, milyen körülmények között mennyi szén képes megkötődni, illetve az egyes szénraktárak miként, milyen sebességgel reagálnak. E területek vizsgálata azért is fontos, mert az imént felvázolt kérdések segíthetnek a szénelnyelést is célul kitűző földművelés módszerek precízebb kidolgozásában. Munkámban bemutatom, hogy egy magyarországi mintaterületen milyen hatással jár a talajszén szempontjából a művelés felhagyása. Kutatásom egyedülálló, mert egy több százéve érintetlen referenciaterület használok, amely igen ritka. Magyarországon pedig elég ritka a több száz éve érintetlen terület. Kutatásom nemzetközileg is kiemelkedik abban, hogy a felhagyott művelésű terület szerves anyagösszetételét kevesen vizsgálták meg az általam használt nem roncsoló eljárással.

2. Irodalmi áttekintés

2.1. A talaj, mint szénraktár

A talaj a Föld legkülső szilárd burkának termékeny része, tágabb értelemben a talajképződés színtere, idegen szóval pedoszféra (STEFANOVITS 1975). A talajökoszisztéma – a betöltött szerepük szerint – négy alrendszerből tevődik össze: a termelési-, a fogyasztási-, a bontási- és az élettelen alrendszerből (WIESMEIER et al. 2019). A talajba kerülő szén az elhalt szerves maradványokból (főleg flóra) származik. A bontási alrendszer felel a szerves maradványok lebontásáért, ezzel növelve a talaj szervesanyag tartalmát. Végso soron pedig szenet, szén-dioxidot és vizet képez, más elemi anyagok, illetve tápanyagok mellett (COLEMAN-WALL 2015; COLEMAN et al. 2018). A szén nagy része tehát a bontási alrendszert képviselő élő szervezetek munkájával kerül a talajba. Kisebb része szervetlen alakban aprózódás és mállás útján lehet szintén jelen a pedoszférában.

A Föld egyik legfontosabb széntárolói a talajok. A szárazföldi ökológiai rendszerek szénkészletének hozzávetőlegesen 80 %-ával a pedoszféra rendelkezik. Ez közel 2500 gigatonnának (petagrammnak) felel meg (LAL 2008). A széntartalom nem egyenletes borításban oszlik el a Földön. Vannak talajtípusok, melyekben több szén található meg. Valamint az sem mindegy, hogy elvi (lehetséges) vagy gyakorlati (tényleges) tárolt szénmennyiségről beszélhetünk. Lehetséges, hogy egy kisebb széntárolási kapacitással rendelkező talajtípus több szenet tárol egységnyi térfogatra vetítve, mint egy nagyobb kapacitással bíró talaj. Ez akképp lehetséges, hogy nem csak a talaj tulajdonságain dől el, hogy mennyi szén van az adott talajban, hanem egyéb környezeti feltételek is hozzájárulnak, mint például a bolygatás. A horizontális eloszlás mellett érdekes lehet a szén függőleges eloszlása is. A mai tudásunk szerint a talaj felső egy méterében, illetve az elsőtől a harmadik méterig található meg a teljes szénkészlet kb. fele-fele. Emellett érdemes megjegyezni, hogy a talajban található szénmennyiséget valószínűleg alábecsüljük (WANG et al. 2010).

2.2 A talajszén fogalma

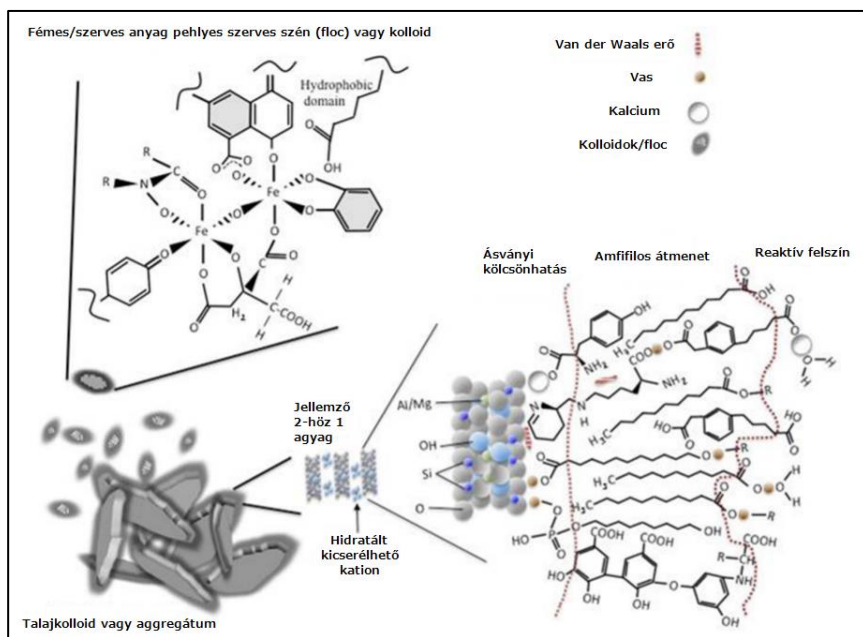
A talajszén fogalma alatt a talajban megtalálható szenet tartalmazó szerves vagy szervetlen vegyületeket értjük. A szűken vett fogalomba a talajban lakó élőlényeket, illetve az élőlények talajban található élő részeit és az esetlegesen a talajban megtalálható faszenet sem veszik bele. Ennek ellenére a mikrobiom részeit, a gombák és a baktériumok többségét a legtöbb szakirodalom mégis ide sorolja. A talajszén körülhatárolása céljából három fogalom

tisztázandó: a talaj szerves anyagtartalma, a talaj szerves széntartalma és a talaj szerves széntartalma. A szervesanyag-tartalom alatt a friss szerves maradványokat, a humuszt, valamint a mikrobiomot értjük. Egyetértés van arról, hogy a szerves anyagok körülbelül átlagosan 58 % szerves szén tartalmaznak (LAL 2004; TIROL et al., 2014). Az élő szervesanyag-tartalom bár vitatott, de ha beleszámoljuk, akkor például a FAO (2017) adatai alapján 10 %-ot tehet ki a talaj szervesanyagából. A friss szervesanyag maradványok az élő szervesanyag-tartalommal együtt (FAO 2017) teszik ki a törmelékes szerves anyag tartalmát. A források viszont abban mind megegyeznek, hogy a törmelékes szervesanyagok közé nem sorolják bele a nagyobb (illetve hosszabb élettartammal rendelkező) élőlényeket, illetve az egyes élőlények részeit, melyek méretüknél és bonyolultságuknál fogva a bioszférához tartoznak. A szerves anyagok közé sorolandó legkisebb részek oldott állapotban lehetnek jelen a talajban, ilyenek pl. az oldható gyökérváladékok, az egyszerű cukrok és bizonyos bomlási melléktermékek. Az oldott állapotban jelenlévő szén a kis méretű, könnyen éghető szén csoportokkal egyetemben nem mondható akár középtávon sem állandónak, az ásványi felületekhez szorosan kapcsolódó szénvegyületekkel ellentétben, melyeket ásványi szerves szénnek neveznek. A törmelékes szerves szén kötődések hiányában nem mondható tartósnak, ezekre a szénvegyületekre gyors átalakulási idő a jellemző. A szerves anyagtartalom legnagyobb részét kitevő humusz a nagyméretű szerves molekulái révén ellenáll a bomlásnak (ZANELLA et al. 2018). A legnagyobb molekulaméretű részek vegytanilag a legellenállóbbak, melyek átalakulási ideje akár több száztól több ezer évig is terjedhet. A talaj szerves széntartalma a talaj szervesanyag-tartalmában található szén, mint összetevőt jelenti (FAO 2017). A szerves szén pedig a talajban megtalálható szerves eredetű szén takarja. Ezek többnyire karbonátos kőzetek úgy, mint a mészkő és a dolomit, melyek mállás révén általában az anyakőzetből kerülnek a talaj alkotórészei közé. A leggyakoribb szerves szén tartalmazó ásványok a kalcit, a dolomit és a nátrium-karbonátban gazdag ásványok. Ezek függvényében nem is meglepő, hogy a mészkőtalajok kivételével a talajokban a szerves szén van többségben (Sanderman 2012). A világ talajaiban lévő szén körülbelül 60 %-a szerves anyagok (a talaj felső egy méterében 1550 gigatonna (LAL 2008), a felső három méterben pedig 2344 gigatonna (GUO–GIFFORD 2002)), míg 40 %-a szerves szén (950 gigatonna (LAL 2008)) alakjában van jelen. Tehát a talajszén fogalma megfelel a talaj szervesanyag-tartalmában megtalálható szerves szén és a talaj szerves szén együttesének. A dolgozatban használt fogalom alapján az élőlények egy bizonyos kis csoportja része a talajszénnek. Az emberi, a külső-, illetve a belső erők okozta más szférából származó talajba került szén ebben a munkában a talajszén közé van sorolva. Így például az ember által a talajba juttatott szerves anyag (trágya, faszén) és az esetlegesen talajba

került kőszén, ha ezek méretüknél fogva alkalmasak (<2mm) szintén beletartoznak a fogalomba.

2.3 A szerves szén megjelenése a talajban

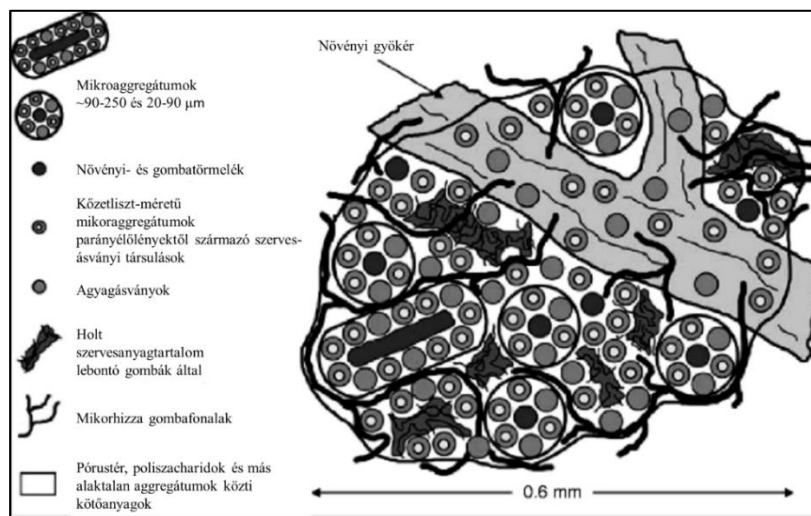
A továbbiakban a talaj szerves széntartalmát az egyszerűség kedvéért az angol megfelelőjének rövidítésével fogom jelölni: SOC (Soil Organic Carbon). A fogalmak mögé a zárójelben az angol rövidítések lesznek feltüntetve. A szerves szén (OC) megjelenési alakja sokféle lehet, melyeket tartósságuk alapján legalább kettő, de inkább három csoportba érdemes sorolni. Az első csoportot az olyan stabil szén adja, mely vegytani kötések által hosszú időn keresztül (bolygatás nélkül, akár ezeréves nagyságrend) képes a talajban tartózkodni. Erre példa a talaj szerves anyagai és a talajban megtalálható fémek összekapcsolódása, melyeket szerves-fém komplexeknek neveznek (LAWRENCE et al. 2015). Másik példa az talajásványok felületén megkötődött szervesanyag (1. ábra), mely a legismertebb és legkutatottabb stabil szerves szénfajta. Ez azért is lehet így, mert nagy súllyal rendelkezik ez a megjelenési forma, mivel az összes ásványi talajban nagy arányú szén kötődik meg ily módon.



1. ábra. A legstabilabb talaj szervesanyag (SOM) megjelenési alakok. Bal felül a szerves vegyületek kötődése a talajban található fémekhez (jelen esetben vashoz). Jobb alul pedig az agyagásványok felületéhez megkötődött szerves szénvegyület látható. Forrás: Eldor 2016

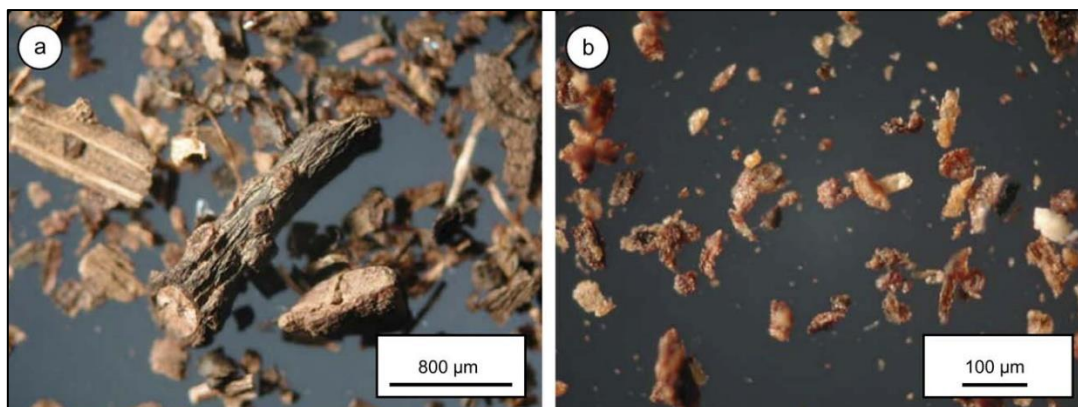
Második csoportot alkotják a feltételesen hosszabb távon talajban tartózkodó szénvegyületek, melyek vagy méretüknél fogva (nagy méretű, összetett szerves anyagok) vagy elzártságukból adódóan (aggregátumok közt rekedt oxigénmentes környezetben található

szerves anyag) nehezebben bomlanak le (2. ábra). E csoport jobban ki van téve a bolygatás veszélyének, mint a legstabilabb csoport.



2. ábra. Egy talajdarabka felépítése, a makroaggregátumok között rekedt szerves szénvegyületek megjelenése. Forrás: Chevallier 2011

A harmadik csoportba a labilis szerves szénvegyületek tartoznak. Ez a csoport a következőket takarja: oldott állapotú szervesanyagok (DOM); törmelékes holt szervesanyagok (POM) (3. ábra) és a parányélőlények szerves anyaga.

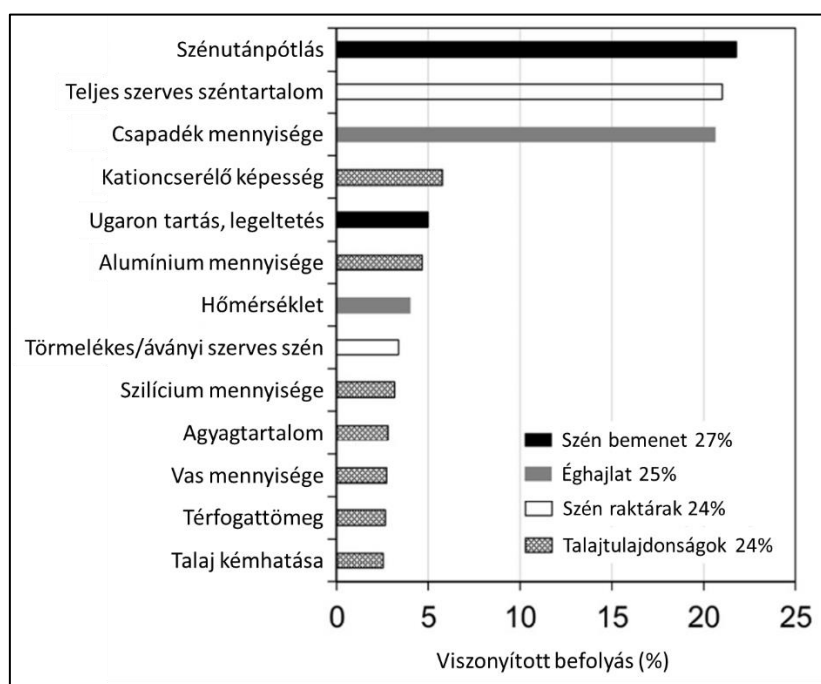


3. ábra. Különböző mérettartományú törmelékes holt szervesanyagok (POM). A talajból elektrosztatikus úton lettek kivonva. Forrás: Lavellee et al. 2020

A szerves szén raktározódása szempontjából az ásványi anyagok felületéhez kötődött szerves szén (angol rövidítéssel: MAOC/M – Mineral Absorbed Organic Carbon/Matter) és az aggregátumok és a törmelékes szervesanyagok (angol rövidítéssel: POC/M – Particular Organic Carbon/Matter) lesznek fontosak (LUGATO et al. 2021). A szakirodalom nagy része ezt a két csoportot tartja a stabil és a gyorsan mozgó szerves szén két legfontosabb tagjának.

2.4 A szerves szén raktározódását befolyásoló tényezők

A legtöbb szakirodalom a szerves szén raktározásával kapcsolatban három fő tényezőcsoportot különít el: az éghajlati tényezőket, a talajviszonyokat és a biotikus tényezőket. LUO és társai (2017) négy csoportra különítették a szerves szén mozgásával kapcsolatos befolyásoló tényezőket. A kutatás szerint a szén raktározására ható tényezők a következőképpen oszlottak meg: a szén forrás 27 %; az éghajlat 25 %; a talaj tulajdonságai (például kationcserélő képesség, agyagtartalom, térfogattömeg) 24 %; a talaj szénraktárai (méret és összetettség) 24 % (4. ábra). A tényezőcsoportok arányai módszertanok szerint változhatnak. Az ok, hogy a következőkben ismertetett befolyásolók mindegyike épít a másikkra, így ezek együttesen hatnak. Ezt bizonyítja az a példa, hogy amikor az éghajlat hatásaiból kivonták a közvetett hatásokat (az éghajlat hatásait a talaj tulajdonságaira és a szénraktár méretére és összetettségére), akkor lényegesen kisebb arányértéket kaptak. Ez a módszer pedig az eredmény nagyfokú bizonytalanságához vezetett. LUO és munkatársai (2017), így többszörösen összetett és bonyolult folyamatok megértése és számszerűsítése segítségével dolgoztak, melynek eredménye a fentebb ismertetett arányok lettek.



4. ábra. A talaj szerves széntartalmára ható tényezők az összesített hatásukhoz viszonyítva (LUO et al. 2017).

A szén bemenetet elsődlegesen a talaj felszínén megtalálható növényborítottság befolyásolja, mert a növényzet az elsődleges szénforrás, ami a talajba kerül (LUO et al. 2017; MEHRA et al. 2018). A növényzet tömege erősen hat a talajba bekerülő szén tömegére. Ezeket

bizonyítja, hogy míg a magas növényborítottsággal rendelkező talajok esetében általában magas a szervesanyagtartalom ($> 1\%$), addig a sivatagi talajok, ahol a természetes növényborítottság nagyon alacsony, $0,6\%$ alatti arányban tartalmazznak szerves szenet (FAO 2017). A növények gyökérzetük révén számos közvetlen és közvetett módon képesek befolyásolni a talajszén mennyiségét, értve ez alatt fizikai (felület, térkitöltés), élettani (gyökérváladékok, élettér) és szerkezeti (aggregátumok egyben tartása, lazítás) szempontokat (HOORMAN et al. 2009; MEHRA et al. 2018; WANG et al. 2010). A növényzet mennyiségén kívül annak minősége is számít. Ilyen minőségi tényező lehet például az egyes növényi maradványok C:N aránya (LUO et al. 2017). Általánosságban kijelenthető, hogy a nagyobb C:N nagyobb szerves szén mennyiséget is jelent. Viszont a magas C:N aránnyal bíró növényi maradványokat a lebontószervezetek a sok elégethető szén következtében kisebb intenzitással bontják le. A kevesebb nitrogént pedig a növények elől elvont nitrogénnel pótolják. Így a nitrogén itt a Liebig-féle minimum elv szerinti legszűkebb keret, mely befolyásolja a lebontást.

A túl kevés nitrogén (és foszfor) visszafogja az elsődleges termelékenységet (primer produkció) a sejtanyagépítők hiányának következtében és ezáltal a lehetségesen megköthető szénmennyiséget is korlátozza (PETERSON–MELILLO 1985). Egyéb minőségi tényező a lignin vagy a cellulóztartalom is, mely szintén befolyásolja a talajban megtalálható mikrobiális életközösségeket, azok szubsztrát-felhasználását. A ligninből származó nitrogén ezek mellett a humifikációban is szerepet játszik (LUO et al. 2017). A növényzet azonban nem csak mennyiségében és övezetes eloszlásában (sivatagos - kevés; dús növényzetű - sok) képes befolyásolni a talaj szerves széntartalmát, hanem a függőleges eloszlás terén is. JOBBÁGY és JACKSON (2000) három növényborítottsági osztályt vizsgálva – gyepes, cserjés és erdős – megállapították, hogy háromméteres mélységig a cserjések hatnak legnagyobb mértékben a talaj széneloszlására, majd ezt követték a gyepes területek, végül pedig az erdőségek. Végző soron érdemes megjegyezni, hogy az elsődleges bemenet – bár túlnyomó többségben a növényzettől függ – más forrásból (pl.: gombák, állatok) is származhat és nagy hatással van rá mind az éghajlat, mind pedig a talaj geokémiai tulajdonsága (LUO et al. 2017).

Általában az éghajlat befolyásoló erejét tekintik uralkodó tényezőnek, így gyakran ezzel magyarázzák a szerves szén különböző megjelenési alakjait és azok bomlását (LUO et al. 2017). Az időjárási (éghajlati) elemek, nevezetesen a csapadék és a hőmérséklet, a szerves szén tárolásának kulcsfontosságú mozgatórugói világszerte és helyi léptékben is. Nagyban befolyásolják a szén bejutását a talajba és a szerves anyagok bomlását. Elsődlegesen a csapadék határozza meg a tiszta elsődleges termelékenységet, azaz a primer produkciót sok, a víz szempontjából korlátozott szárazföldi környezetben, ezáltal a szén talajba jutását is. A nedves

körülmények elősegítik a szerves szén szilárdító ásványi felületek kialakulását az alapkőzet fokozott mállása révén, bár gyakran a talaj túlzott savanyodását okozzák, ami a talaj szerves anyagának mérsékeltebb bomlásához vezet (WIESMEIER et al. 2019). A nedves körülmények járultak hozzá a legnagyobb szénmennyiséget tároló, mérsékelt övezeti területek kialakulásához. Ezek a területek a tőzeglápok, melyekben a vízborítottságnak köszönhetően gazdag élővilág alakult ki. A légmentes (anaerob) részleges lebomlás következtében tőzeg vagy tőzeg jellegű szervesanyag felhalmozódás ment végbe. A hőmérséklet is nagymértékben befolyásolja a szerves anyagok mikrobiális lebomlását, mivel ezek összetett molekuláris tulajdonságainak köszönhetően magas belső hőmérséklet-érzékenységgel rendelkeznek (ZHOU et al 2018.), bár ezt a kapcsolatot többféle korlát is szabályozza. A hideg övezetben található meg az északi féltekén a legnagyobb viszonyított mennyiségben tárolt szerves szén, mely a permafroszt (állandóan fagyott) területen tárolódik, főleg a tőzeges talajokban (FAO 2017). A hőmérséklet növekedésével és a csapadék csökkenésével a szerves szén mennyisége csökken (WIESMEIER et al. 2019), így a nedves és hűvös térségek rendelkeznek nagyobb szerves szénmennyiséggel, mert itt kisebb a bomlás a kevesebb energia és a sok oxigénmentes környezet miatt. Tehát nem meglepő a hisztoszolok nagy szervesanyagtartalma (FAO 2017). Emellett a tényleges párolgás is összefüggést mutat a szerves szén tartalmával. A kis párolgási értékeknél a talaj szervesanyag-tartalma nagyobb lesz, mint egy erősen párolgó környezetben. Fontos itt is kiemelni, hogy az éghajlati tényezőket együttesen kell vizsgálni, melyek akár erősíthetik is egymást. A mélység növekedésével az éghajlati tényezők azonban egyre kevésbé befolyásolják a szerves anyagok mennyiségét (BURKE et al. 1989). Világátlagban a felső 20 cm-ben függ össze a legnagyobb mértékben a talajban megtalálható szerves szén mennyisége az időjárási elemek váltakozásával, így az éghajlattal (JOBÁGY–JACKSON 2000).

A talajban a felső 20 cm alatt tehát nem az éghajlati tényezők lesznek a fő meghatározók, itt nagyobb szerep jut a különböző talajtulajdonságoknak. Sós területeken az elektromos vezetőképesség negatív hatást gyakorolt a szén-dioxid kibocsátásra. Általánosságban viszont a legfontosabb meghatározó talajtulajdonság a talaj kationcserélő képessége. Ez a fogalom azt takarja, hogy a talajnak mekkora a képessége a pozitív töltésű ionok megtartására, illetve azoknak cseréjére. Elég sok tényező befolyásolja a képességet, vannak fizikai (talajszerkezet, kolloidok), biológiai (szerves anyagok) és kémiai (pH; ásványtan) tényezők, melyekből következtetni lehet a kationcserélő képességre, mivel ezek a tulajdonságok nagyban meghatározzák azt (KHALEDIAN et al. 2017). A szerves anyag a negatív elektrosztatikus helyek fő forrása, így minél nagyobb a szervesanyag-tartalom annál nagyobb kationcserélő képességre számíthatunk. A kationcserélő képesség elősegíti a különböző szerves szénformák különböző

mértékű állandósulását. Emellett a talaj ezen tulajdonsága egy jó mutató a termékenység meghatározására, valamint a vízvisszatartó-képességgel is pozitívan függ össze (OLORUNFEMI et al. 2016). A kationcserélő képességre tehát a talaj anyakőzete, vagyis az ásványi tartalom anyaga és szemcsemérete is hat. Ezek közvetlen és közvetett módon is (mint a legtöbb tényező) képesek befolyásolni a talaj szerves széntartalmát. Az agyagtartalom kedvező hatással van a talajban található szerves anyagok mennyiségére (SWETHA–CHAKRABORTY, 2021). A homokkal a szén mennyisége mindenhol fordított összefüggést mutat, tehát a homoktartalom arányának növekedésével a szerves széntartalom csökken (JOBBÁGY–JACKSON 2000). Ez annak is köszönhető, hogy a homokban gazdag talajokban nagyobb a könnyebben átalakuló oldott szerves széntartalom (DOC) (LI et al. 2021). A szemcseméret-tartomány azáltal hat, hogy a kisebb szemcseméret nagyobb reaktív felületet eredményez, ezáltal nagyobb szénmennyiség megkötését teszi lehetővé (ásványi szerves szén). Az agyagtartalom a szerves szén állandósulásában (stabilizálásában) játszik fő szerepet. A kis szemcseméret-tartomány hátrány is lehet, mert így jobban ki vannak téve az ebben gazdag talajok a külső erők pusztító hatásainak. Ez általában más tényezők rossz együtt állásának következménye, például egy kiszáradt bolygatott talaj nagyon ki van téve a szélnek. Itt kapcsolódik össze a talaj szerkezete más – nem a talaj tulajdonságaival kapcsolatos – tényezőkkel, mint a domborzat, az éghajlat vagy a növényborítottság (GANUZA-ALMENDROS 2003; HOORMAN et al. 2009; MEHRA et al. 2018). A talaj pH értéke is megszabhatja annak szerves széntartalmát. A talaj kémhatására – ahogyan már említettem – az éghajlat nagy hatással van (WIESMEIER et al. 2019). A savanyúbb körülményeket jobban szerető gombák baktériumellenes (antibakteriális) szert termelnek. Az ebből adódó lebontási hiány hozzájárul a szerves savak épen maradásához, mely tartósabb szén és savanyúbb talajt eredményez (PONGE 2003). Tehát a pH nagy mértékben befolyásolja a könnyen bomló és a mikrobiális szerves széntartalmat (LI et al. 2021). A nagyobb pH érték a kationcserélő-képesség csökkenését is eredményezheti (KHALEDIAN et al. 2017). A kationok, például a vas- vagy az alumínium-ion szintén elősegítik a szerves szén raktározódását a szerves vegyületek szélén található kötőcsoportokkal (funkciós csoportokkal, ligandumokkal) történő reakció során. A szerves-fém komplexek is segítik hosszabb (akár több százéves) távlatban tárolni a széntartalmú vegyületeket (LAL–KIMBLE 1997; LAWRENCE et al. 2015). TORN és társai (1997) a talajszén raktározásával kapcsolatban a nem kristályos ásványok és a szerves szén között támogató összefüggést figyeltek meg. Ennek alapján a szerves szén és a nem kristályos ásványok a mélyebb talajokban együtt mozognak. Kutatásuk szerint az ásványi anyagokhoz kötött szén ezeréves körforgásának változásai, nem pedig a gyorsan változó szerves anyagok mennyiségének vagy az elsődleges termelékenységnak a változása határozza meg a talaj

mélyebb rétegeiben tárolt szerves széntartalmat. LAWRENCE kutatótársaival (2015) hasonló eredményre jutott. Az éghajlatváltozásra mindazonáltal a rövidtávú változások vannak elsődleges hatással, így a dolgozat főleg a rövid távon változó szénmennyiséggel és ennek a befolyásoló tényezőivel foglalkozik. A talajszén raktározás és a szilikát tartalom a kationcserélőképességhez és a korábban leírt fémekhez hasonlóan összefügg, de az eddigiekkel ellentétben kisebb széntartalmat jelent (LUO et al. 2017). A talajtulajdonságok közül a talajban megtalálható befolyásoló tényezők mellett a talaj szerkezete is nagy hatással bír. A talaj térfogattömegének növekedése a talajszén mennyiség csökkenésével jár, köszönhetően többek között az egységnyi tömegre jutó felület csökkenésének, valamint fokozott dinitrogén-oxid és metán kibocsátással jár együtt (MEHRA et al. 2018). A talaj szerkezete és a szerves szén tárolása szempontjából is fontosak a nagyobb szerkezeti egységek, azaz a makroaggregátumok. Ezek kisebb egységekből, szerves maradványokból, de akár élőszervezetből is összeállhatnak és a glomalin vagy gyökérváladákok szolgálnak ragasztóanyagként. A nagy méretű talajképzők előszeretettel fognak körbe kevésbé lebomlott szerves anyagokat, melyek a makroaggregátumokból kiszoruló oxigén hiányában nem bomlanak le (JOHN et al. 2005). A térfogattömeg növekedése és a makroaggregátumok szétesése a talaj tömörödéséhez vezet, ami rosszabb vízvezetőképességet és kisebb talajéletet eredményez. Végző soron ez is a talaj szénmennyiségének csökkenéséhez vezethet (HOORMAN et al. 2009; WRIGHT–HONT 2005). A túl sok csapadék és a nagyobb hőmérséklet szintén az aggregátumok bomlásához vezet (LI et al. 2021).

A talajszén megjelenési formáihoz kapcsolódik a talajszén raktározó képessége és raktár összetettsége. Az előzőekben felsorolt tulajdonságok alapján meg van szabva, hogy milyen tartományból/ megjelenési formából mennyi szén lehet jelen a talajban. A talajszén megjelenési alakjai eltérő lebomlási képességgel rendelkeznek, mely a következőképpen néz ki: törmelékes szerves szén (POC)>ásványi anyagok felületéhez kötött szerves szén (MAOC)>nagy molekulájú szerves szén. Látszik, hogy alapvetően két tényező határozza meg a szerves szénraktárt: a tárolt mennyiség és az anyagi összetétel. A szerves szénkészlet mennyiségének befolyása egyértelmű, de az összetettséget érdemes jobban megvizsgálni. A nagy molekulatömegű szerves szén átalakulási ideje akár 100 év is lehet (FAO 2017), így hosszabb távon képes tárolódni, ennek következtében a részaránya elég fontos. A másik mutató a POC és a MAOC aránya. Minél több POC tárolódik a talajban, annál kitettebb a szén mennyisége a változásnak, míg az MAOC jobban képes tárolódni (LUO et al. 2017). A huzamosabb ideig tárolódó szén többnyire nem a talaj felszínénél van jelen, mivel az elméletileg idősebb szén mélyebben helyezkedik el. Fontos megállapítás még, hogy a védett szerves szénkészlet az

összes szerves szén mintegy 95 %-át teszi ki, így a szerves szén mozgásában a védett szénnek tulajdonítható a meghatározó szerep. A védett szerves szén mozgása a talajszén befolyásoló tényezők változásakor következik be (LUO et. al. 2017).

LUO és társainak (2017) kutatása szerint a szén bemeneti mennyisége, a kezdeti időpontban jelen lévő összes szerves széntartalom és a csapadék a három leghatékonyabb befolyásoló tényező a szerves szén változására nézve (4. ábra). A szerves szén változásának több mint 60 %-át ezek magyarázták. Több kutatás is hasonló eredményre jutott, tehát az éghajlati elemek (főleg a csapadékmennyiség és a hőmérséklet), és a földhasználat változása voltak a legmeghatározóbb szerepben, de néhol az agyagtartalmat vagy a víz visszatartó képességet fő tényezőnek tekintették (GANUZA–ALMENDROS 2003).

Egy erős emberi befolyás alatt álló területnél az emberi jelenlét felülmúlja a többi befolyásoló tényezőt és legnagyobb mértékben ez lesz a talaj jellemzőinek a fő alakítója. Az emberi hatások (változó erősséggel) az erdők legalább 60 %-át, míg más természetes ökoszisztémák, például szavannák, természetes gyepek legalább 70 %-át (SHUKLA et al. 2019) érintik. A földhasználat többek között lehet a beépítés, ami bár nem nagy arányú világviszonylatban nézve (a földterületek 0,6 %-a (OECD, 2014), az élhető földterületek 1 %-a (RITCHIE–ROSER 2013), de helyi szinten jelentős mértékű lehet. Emellett a beépítés aránya az idő előrehaladtával folyamatosan növekszik, a talaj szén-dioxid tartalma pedig ezzel párhuzamosan csökken a beépített területek következtében. Másfajta hasznosítás az erdőgazdálkodás vagy a bányászat, szintén nagy befolyással bírhat a talajszén alakulására. Azonban egy kiemelkedik a többi közül: a művelt földterület. Ennek oka, hogy az élhető területek felét az agrárgazdaság hasznosítja (RITCHIE–ROSER 2013). A művelt területek fontosságát a nagy számú szakirodalom remekül szemlélteti.

2.6 A földhasználatváltozás hatása a talaj szerves széntartalmára

A természetes talajokban megfigyelt egyensúly az összetett folyamatok és a befolyásoló tényezők, akár egymást erősítő, akár egymást gyengítő hatásai, kiegyenlített állapotot hoztak létre, mely – ha nem feltételezünk véletlenszerű természeti eseményt – emberi léptékben tartósan bizonyul. Ebből kiindulva természetes körülmények között egy adott területen az összes szénmennyiségből a szerves szén aránya egy állandó értéknek mondható, mivel ez képviseli az egyensúlyt a talajba (főleg növényzet által) adott és a vizekbe vagy a légkörbe leadott szén között (CARRENHO et al. 2020; FILIPPI et al. 2020).

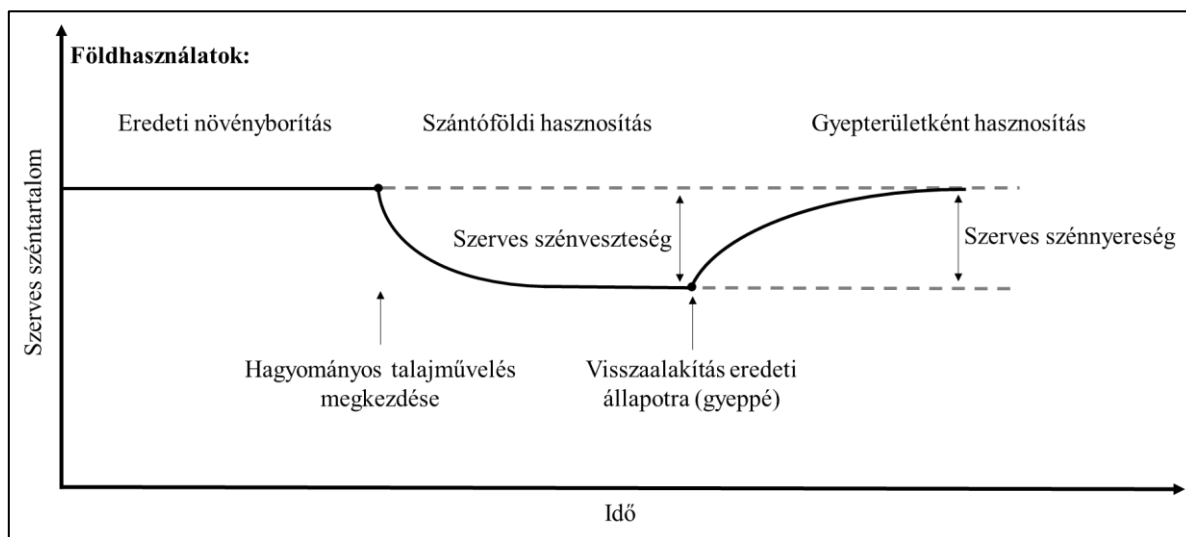
2.6.1. A hagyományos talajművelés hatása a talaj szerves széntartalmára

A művelés alá vont területeken a szántóföldi hasznosítás felborította a természetes egyensúlyt (CARTER 1993). Erre jó példa, hogy ha egy természetes élőhelyül szolgáló rendszert mezőgazdasági termelési rendszerre alakítanak át, akkor a mérsékelt területeken kb. 60 %-os szerves szénvesztést mérhetünk. Ez egyebek mellett energiaigényes folyamat, mely következtében jelentős üvegházgáz-kibocsátás várható az átállás után (LAL 2004). Ez a veszteség azért ilyen nagymértékű, mert az emberi beavatkozás az összes szénmennyiséget befolyásoló tényezőre hat. A szén utánpótlása esetén a táblákon termesztett vagy az éppen ugaron kialakuló növények és a termények elszállítása egy igen erős befolyásoló tényező (CAMPBELL et al. 1995; JOHN et al. 2005; KHALEDIAN et al. 2017). A termesztett növények elsődlegesen felhasznált része nem kerül vissza a talajba (vagy csak a feldolgozás utáni maradék), de még az olyan növényeknél is, melyeknél a termés nem egyezik meg az elsődlegesen felhasznált terménnyel, az egész növény elszállításra kerül és másodlagos felhasználási céllal hasznosítják (például alom vagy energia). Ezáltal a növények által megkötött szén nem kerül vissza a talajba, hanem közvetlenül (égetés) vagy közvetve (előállított termékek égése (oxidációja) során) visszajut a légkörbe, így a talajba bekerülő elsődleges szénforrás megszűnik/nagy részben korlátozódik. A talajszén bemenet kiesése az utánpótlás hiányához vezet, ami csökkenti a talaj széntartalmát, hisz a talajlakó szervezetek a maradék széntartalmat felhasználják. A szántóföldi művelés során (legtöbb esetben) az elszállított szerves anyagokat nem pótolják szerves trágyával. Így fennáll a fentebb felvázolt helyzet, miszerint nincs a talajnak szénutánpótlása. A művelési módok többségében alkalmazott eljárás, a műtrágyázás, mely során a talaj előnyös szén-nitrogén egyensúlya felborulhat, hosszan tartó magas arányú használat mellett a talaj szervesanyagának kémiai összetételében és a mikroba-közösségekben is változásokat okoz (NEMERGUT et al. 2008). Észak-nyugat-európai vizsgálatok alapján elsősorban a baktériumok terén mutatkozhat meg leginkább a különbség, már rövid időtávon is. De a gombák (fungi) is elszenvedői lehetnek (GOSLING et al. 2017). A túlzott műtrágya-használat a talaj nagyfokú elsavanyodásához és nagyobb dinitrogén-oxid kibocsátáshoz vezethet, így fontos lenne, hogy a körforgásos folyamatba beépülő, a természetben is megtalálható hozamnövelő anyagok legyenek felhasználva (WANG et al. 2010). Azt azonban meg kell jegyezni, hogy valószínűleg hosszabb távon jelentkezhet az eljárás SOC-t támogató hatása. Rövid időtávon több kísérlet sem talált nagy különbséget a feltalajban a kémhatást illetően, amikor egy gyepterületet újra művelés alá vontak (GOSLING et al. 2017). A hagyományos talajművelés (a hűvösebb éghajlatokat kivéve

(BROWN et al. 2020)) több módon is a talajszén csökkenéséhez vezet. Ez a tápanyaghiány mellett a szántásnak köszönhető. A talajba történő nagyobb oxigénbevitel fokozza a lebontó szervezetek tevékenységét. A lebontók a talajban megtalálható szerves anyagokat gyorsabban és/vagy nagyobb mennyiségben képesek feldolgozni, ami a talajszén csökkenéséhez vezet. Mindemellett a szántás során használt gépek teljesen szétroncsolják a talaj addigi szerkezetét, amely a száraz időszakokban kiszáradhat és ez a behatolási ellenállás növelését eredményezi (MEHRA et al. 2018). A talajművelés a talaj tömörödéséhez vezethet, ami a talaj szerkezetének megváltozásával jár (WRIGHT–HONT 2005). Akár már 11 éves szántás esetén a makroaggregátumok szétesnek, és a bennük tárolódó szénhez hozzáférnek a talaj lebontó szervezetei (JOHN et al. 2005; RESCK et al. 1991). A szántás következtében a talaj vízháztartása felborul, a víz a talajban keletkező repedések között elszivárog, a talaj pórustereiből a vízgőz távozik, ami a talaj kiszáradásával jár. A párolgást és a vízvesztést fokozhatja a talajborítás hiánya. Az intenzív talajművelés következtében a csökkenő szerves szénmennyiség miatt mérséklődik a kationcserélő képesség (KHALEDIAN et al. 2017). A kisebb termékenység kevesebb, a növények által megkötött szénmennyiséget eredményez, így az esetlegesen a talaj felszínén hagyott maradványok összes széntartalma is kisebb lesz. A műtrágyázás pedig nem tudja megoldani a teljes problémakört, hisz sok esetben csak fokozza azt. A talaj eredeti szerkezetének szétesésével a kisebb szemcsék a szárazabb környezetben jobban ki vannak téve a külső erők hatásának (szél, víz, hőmérséklet, gravitáció). Ez a tény pedig a talaj fedetlenül hagyása mellett a külső erők romboló hatásait erősíti (esőcseppek, szél, víz romboló hatása) (BOUCHOMS et al. 2017). Az évszázadok óta szántott területeken lehet legjobban megfigyelni a talajpusztulást és a talaj szerkezetének romlott állapotát (KHALEDIAN et al. 2017). A talajpusztulás okozta elveszett szántóterület 2–5 millió hektárt jelent világszerte (BRINGEZU et al. 2014). BROWN (1993) egy kolumbiai kutatásában azt fogalmazta meg, hogy 100 év szántás hatására akár az egész feltalaj, míg 6 év intenzív művelés esetén akár a feltalaj fele is lepusztulhat. A talajpusztulás következtében csökken a vízvisszatartó-képesség, mely gyéresebb termésátlagokat eredményez, amellet, hogy maga a talajpusztulás is szénvesztéssel jár. Az ismertetett negatív hatások következtében a szerves széntartalom csökken, ezzel egy új egyensúlyi (kisebb széntartalmú) állapotba tolva el a talajt. A szántóföldi talajokból származó metán mennyisége révén nagyobb hatású az éghajlatváltozás erősödését tekintve (hasonlóan a megnövekedett szén-dioxid kibocsátáshoz), mint például az erdei talajokból felszabaduló metán (MEHRA et al. 2018). A szántás következtében a talaj nitrogéntartalma is jelentős csökkenésen megy keresztül (60 év alatt 30 % (BROWN 1993)), melynek egy jó része a szintén üvegházhatású dinitrogén-oxid alakjában távozik a talajból.

2.6.2. A művelt terület visszaalakításának hatása a talaj szerves széntartalmára

A művelt területek teljes felhagyása több okból is bekövetkezhet. Akár természetvédelmi (GOSLING et al. 2017; CHANG et al. 2011), akár értékmegőrzési (BOTOS et al. 2017) szempont alapján történik ilyen visszaalakítás, a tevékenység remek módja a szerves szén eltárolásának a talajban. Legalább is régen szinte egyeduralkodó elgondolás volt ez a szakirodalomban. Ezt támasztja alá, hogy a nemzetközi szénelnyelési célok teljesítéséhez szükséges módszerek közé is bevették, sőt mind a mai napig számolnak vele (SMITH et al. 2005; SMITH et al. 2008). Éppen ezért számos ehhez kapcsolódó programot találhatunk világszerte. A legjelentősebb ilyen programok Kínában, az Európai Unióban és az Amerikai Egyesült Államokban találhatóak (GOSLING et al. 2017). A szénvisszaáramlás elmélete szerint a hagyományos talajművelés rossz hatásait (talajmozgatás, szerves anyag elvitel, tömörödöttség) megszüntetve a talaj eltolódik egy új, nagyobb széntartalommal rendelkező egyensúlyi állapot irányába, amely egyre megközelíti az eredeti, művelés kezdete előtti, állapotot (5. ábra). Kezdetekben azonban nagyon kevés adat állt rendelkezésre, nagyon nagy volt a bizonytalanság (SMITH et al. 2005). Másik nagy gond volt – mely lényegében mind a mai napig fennáll – hogy nem ismerjük elég részletesen a folyamatokat és a kölcsönhatásokat. Ezen bizonytalanságok miatt az újabb kutatások alapján túlságosan felülbecsülték e módszer szénmegkötő képességét (GOSLING et al. 2017). Ma már több kutatás, több adat rendelkezésre, azonban annyi még nem, hogy az eltérő földrajzi környezetekhez igazodva értékelni lehessen a módszer hatásosságát.



5. ábra. A talaj szerves széntartalmának (SOC) alakulása a különböző területhasználatok során, az idő függvényében.

A módszer működésének (illetve működésképtelenségének) megértése céljából a szerves széntartalom mellett érdemes más tulajdonságokat és tényezőket figyelembe venni. A szakirodalom a szervesanyag bemenet terén nagy hangsúlyt fektet az adott terület növényzetére

(BOTOS et al. 2017; Fu et al. 2010); elhelyezkedésére (ZHANG et al. 2013); a makrobontók jelenlétére, minőségére (LANDI et al. 2018), valamint a talaj fizikai és vegytani tulajdonságaira (kémhatás, a talaj nitrogén-, illetve foszfortartalma, a térfogattömege). A szerves szén minőségével, összetételével, illetve a tényleges altalajjal csak nagyon kevesen foglalkoztak.

A módszer hatásosságával foglalkozó tanulmányok eredményei megosztóak. Régebbi, egy-egy területnek lényegében csak a felső 15 cm-rel foglalkozó, tanulmányok (MENSAH et al. 2003) a módszer hatásosságát mutatták. Újabb kutatások, amelyek már 30 cm mélyen vizsgálták a talajt és nagy táji léptékben is folytatták a tanulmányozást, közel sem látják ennyire egyértelműen a helyzetet. GOSLING és munkatársai (2017) például más eredményre jutottak, mint az őket megelőző tanulmányok. Az Egyesült Királyságban lefolytatott tanulmány alapján a felső 0–30 cm-ben rövid idő alatt (1–3 év) nem volt jelentős változás a SOC-ban a szántóföldek kaszáló rétekké történő átalakításakor. Táji léptékben 17 területpárt megvizsgálva arra jutottak, hogy az idő (6–17 éves területpihentetések) előrehaladtával nem gyülemlett fel lényegesen több SOC a talajban az első egy-két évvel összehasonlítva. Ugyanezen vizsgálat másrészt megosztó eredményt hozott, mert megesett, hogy a területpihentetés tartalmazott jelentősen több SOC-t, de megesett többször az is, hogy a szántó. Kínában a Löss-fennsíkon folytatott kísérletek során ($> 12^\circ$ -os lejtőkön) 0–100 cm-es mélységben vizsgálódva hasonló eredményre jutottak. Rövid időtáv (3 év) alatt a természetes növényzet nem kötött meg jelentősebb SOC mennyiséget, ezzel szemben a takarmánynövénnel beültetett talaj szignifikáns növekedést tapasztaltak (FU et al. 2010). Viszont más kutatások, mint például LETTENS és munkatársai (2005), akik Belgiumban nagy adathalmazzal térinformatikai módszerrel dolgoztak a teljes ország területére, átlagos 14 t C/ha széntartalom-növekedést becsületek 40 év alatt szántóföldről legelőre történő átállás során. Szintén Európában, POEPLAU és DON (2013) 18 ± 11 t C/ha növekedést figyeltek meg ugyanilyen földhasználat-változtatáskor. Érdekes még megjegyezni, hogy földhasználatváltozáskor ennél és még sok más (ECLESIA et al. 2012) kutatásnál a POM, tehát a gyorsan mozgó szerves szén felelt a változások jelentős részéért. Más tanulmányok (WANG et al. 2001; GUO et al. 2011) is hasonló eredményre jutottak, főleg szárazabbnak mondható területeken. 28 éves természetes növényborítású talajt vizsgálva az általánosnak mondható eredményt kapták: a természetes gyepek jó szénmegkötő képességét állapították meg. Hozzájuk hasonlóan WEI és munkatársainál (2009) is megegyező eredmények születtek, ugyanúgy a Kínai-Lössfennsík területén. Kutatásuk bemutatja hosszabb időtávlatban, szintén 28 év alatt, szintén egy viszonylag szárazabb vidéken (437 mm) a természetes gyepek lényegesen több szenet voltak képesek megkötni 0–40 cm-es mélységben, mint a takarmánynövényként is felhasznált növényzet. A Kínai

Löszfennsíkot vizsgálva megállapítható, hogy a nedvesebb részeken a takarmány és még inkább az erdők (kínai fenyők) képesek a legtöbb szén a talajba visszajuttatni, míg a szárazabb vidékeken a természetes gyepek (WEI et al. 2009).

Magyarországon nagyon kevés olyan területet ismerünk, amelyeken le lehetne folytatni az előző bekezdésben bemutatott kísérleteket. BOTOS és munkatársainak (2017) sikerült a fentiekhez hasonló kutatást lefolytatni. Kilenc tiszántúli kunhalmot vizsgáltak a szerves anyagfelhalmozódás szempontjából. Magyarországon a kunhalmok 2010-től kezdődően védettséget élveznek, így a rajtuk folyó művelés is megszűnt. BOTOS és munkatársai 2014 és 2016 között háromszor mintázták meg a kunhalmokat, hogy felmérjék az esetlegesen bekövetkező változásokat. A szerves anyagfelhalmozódásban nem találtak jelentős különbséget (bár nagyobb volt az érték a halomtetők esetében, mint a szántókban) a szántók és a felhagyott kunhalmok talajai között. A CaCO_3 , a foszfor terén azonban elmozdulás történt a természetes löszgyepek irányában. A kutatók a tápanyag-kimosódás hiányával magyarázzák a löszgyepek elterjedésének hiányát, ami a szerves anyagfelhalmozódást jelentené, melyet a zárt növényzet és viszonylag kevesebb csapadék okoz. Tehát a 4–6 év még nem volt elegendő egy magyarországi körülményeknek kitett területnél a természetes állapothoz közeli értékek kialakulására.

A növényzet, a kitettség és az időjárási körülmények (pl.: csapadék) sok mindent befolyásolnak, így nehéz általánosításokba bocsátkozni. Az eredményeket ezért fokozott figyelemmel lehet csak a hasonló és a környező területekre értelmezni. A földhasználat-változás időtartamának a hatása megosztó, de érdekesebb lehet hosszabb távon vizsgálni, hisz rövid távon a tartósabb folyamatok még nem mutathatnak tényleges eredményt. A fent bemutatott irodalmakban az egyik közös pont volt, hogy az altalajra nem találtak lényeges különbséget, ami arra utalhat, hogy érdekesebb elsősorban a feltalajjal foglalkozni.

3. Kutatási kérdések

A fentiekben bemutatott kutatások nagy pontossággal nem vetíthetők ki nagyobb területi léptékekre vagy legalább is nagyon eltérő éghajlatú és domborzatú területekre, így érdemes minél több helyszínen vizsgálni. Egy–egy ilyen vizsgálható helyszín (főleg a kis területű agrár beállítottságú Magyarországon) valódi kincs, mert nehéz olyan területet találni, amely hosszú idő óta nem állt művelés alatt és mellette vagy hozzá közel található hasonló adottságú szántótalaj az összevetés kedvéért.

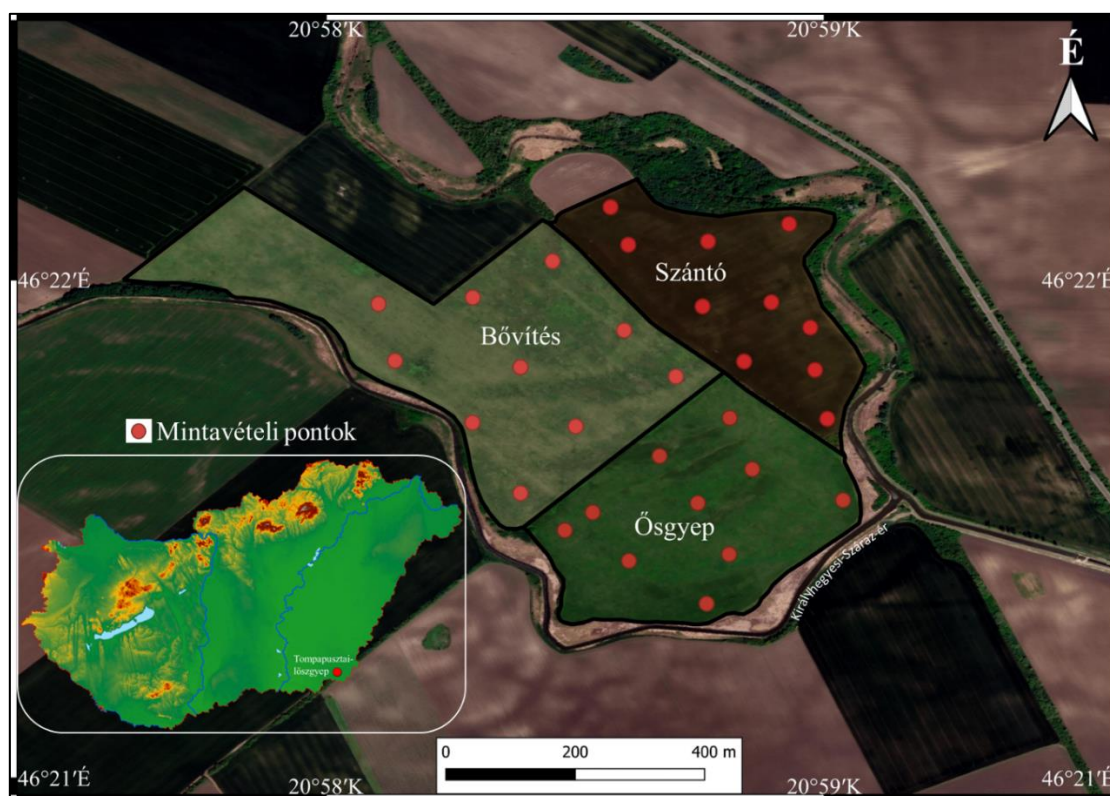
Kutatásom középpontjában a műveléssel való felhagyáskor visszaáramló szervesanyagtartalom mennyiségének és minőségének vizsgálata áll. Azt fogom megvizsgálni, hogy egy művelésből kivont terület talajtulajdonságai hogyan viszonyulnak egy még művelés alatt álló és egy még sohasem szántott talajhoz. A kutatás során vezető kérdéseimnek tehát a következőket tűztem ki:

- *Hogyan viszonyul a felhagyott talaj szerves anyag tartalma a szántóhoz, illetve az ősgyephez?*
- *Milyen a szerves anyagfelhalmozódás dinamikája, valamint mennyi idő alatt telítődnek az egyes raktárak?*
- *Milyen az egyes talajkezelési módok alatt található szerves anyag összetétele?*
- *Hogyan hatnak egymásra az egyes vizsgált talajtulajdonságok?*

4. Anyag és módszer

4.1 A kutatási terület

A kutatási terület (6. ábra) Battonyától, egy Békés megyei határátkelőtől 8 kilométerre északra található (é. sz. 46,3574043°; k. h. 20,9730791°, tszf. m. 97–99 m). A hely a Tompapusztai löszgyep nevet viseli, azonban a helyi elnevezése Külső-Gulya (CSATHÓ–CSATHÓ 2009). 1785-től kezdődően (első katonai felmérés ideje) biztosan vagy gyepterületként, vagy legelőként hasznosították egészen az 1960-as évekig. Azóta évente egyszer kaszálják a területet (BARCZI et al. 2011). A területet 1979-ben „fedezték” fel és 1989-ben nyilvánították fokozottan védetté. Ma a Körös-Maros Nemzeti Parkhoz (KMNP) tartozik és Magyarország legnagyobb összefüggő, zonális helyzetű ősi löszpusztarét állománya (6. ábra: Ősgyep). Jellemző társulása a löszpusztarét (*Salvia nemorosae-Festucetum rupicolae*), a gyomok száma elenyésző (CSATHÓ–CSATHÓ 2009). Az ősgyepet délről a Királyhegyesi-Száraz-ér védi, egyfajta természetes védőgátként. A KMNP igazgatósága 2009-ben az ősgyeptől ÉNY-ra elhelyezkedő szántóföldekből kibővítette a fokozottan védett területet. Ezt természetes szukcesszió útján (BARTHA et al. 2011) kívánják az ősgyephez hasonló állapotba hozni. A terület a mintavétel időpontjában már 12 éve műveletlen volt. Ezt a továbbiakban a bővítés névvel fogom említeni.



6. ábra. A kutatási terület térképe a Google Műhold felvétele alapján. A bal alsó sarokban, a Magyarország ábrán a piros pont jelzi a kutatási terület elhelyezkedését az országon belül.

A térség évi átlaghőmérséklete 10,6 °C és a napsütéses órák száma 2000 óra/év (SZABÓ et al. 2014). A lehullott csapadék mennyisége az elmúlt 30 év átlaga alapján 585 mm (ATVIZIG 2021). A terület természetvédelmi és növénytani szempontból jól kutatott. A terület bővítése során megvalósult a talaj magyar szabvány szerinti osztályozása (BARCZI et al. 2011). A talaj a magterületen mészlepedékes csernozjomnak, a Száraz-ér mentén egy helyen mélyben sós csernozjomnak felel meg.

A bővítés óta eltelt 12 év, a közös fejlődéstörténet és a kis távolságok alkalmassá tették a helyszínt a területhasználatból adódó szerves anyagtartalom-változások vizsgálatára. A területet ebből a szempontból korábban nem kutatták.

4.2 A mintavétel

A mintavételre 2021 júniusában került sor. A minták 3 egymás mellett fekvő területről származnak, melyek a következők: ősgyep, bővítés és szántó. Mindegyik területen 10 fúrás történt 0–100 cm-es mélységben. Az ősgyep esetében a természetvédelmi szakember jelenlétében vettük a mintákat. A mintákat Pürckhauer-féle szűrőbot és kézi rétegmintavevő eszközök segítségével gyűjtöttük, az egyes rétegek szerint külön lettek lemérve és eltárolva. A begyűjtött mintákból ebben a kutatásban csak a feltalajt (0–30 cm) vizsgáltam. Ez a vizsgálatok során összesen 30 mintát eredményezett.

4.3 A talajminták előkészítése

Az előkészítést és a méréseket a CSFK FTI Sedilab laboratóriumában végeztem 2021 ősze és 2022 tavasza között.

A talajminták szobahőmérsékleten száradtak tömegállandóságig. A méréseket 2 mm-es szitán átszitált, levegőn szárított anyagon végeztem. A kísérletek előtt a nagyobb gyökereket, puhatestűek vázait csipesszel és elektrosztatikával távolítottam el.

4.4 Az elvégzett mérések

A következőkben elvégzett mérésekhez analitikai mérleggel mértem ki a tömegeket. A különösen nagy pontosságot igénylő méréseknél 5 tizedesjegy pontosságú mérleget használtam. Két nagy csoportra lehet bontani a bemeneti mintákat: az ömlesztett talajmintákra és az elkülönített talajmintákra.

4.4.1. Teljes talaj

Az teljes talajmintákból a szemcseméret-eloszláshoz a szerves anyagot (OM) H_2O_2 -dal, a CaCO_3 -ot 10 %-os HCl segítségével távolítottam el, és a mintát 0,5 M nátrium-pirofoszfátban diszpergáltam (CENTERI et al, 2015). Ezután egy lézerdiffrakciós szemcseméret-elemző (Malvern Panalytical Mastersizer 3000 Hydro EV) segítségével határoztam meg a talajszemcsék nagyságát. A minták kémhatását mind desztillált vízben (H_2O), mind pedig 1 M-os kálium-kloridos (KCl) oldat felhasználásával megmértem. A minták 1:2,5 arányban lettek bekeverve és 12 órán keresztül álltak összerázás után. A 12 óra leteltével egy Consort multi-parameter analyser C3010 asztali mérőeszközzel és egy HI1330 pH-elektrodával lettek megmérve. A desztillált vizes szuszpenzió elektromos vezetőképességet (EC) is mértem, melyet Jenway 4510 vezetőképesség/TDS mérőműszer segítségével határoztam meg. A vegytani elemek és a teljes szénmennyiség meghatározásához egy Dumas elven működő Elementar Vario macrocube CHNS elemanalizátort használtunk. A mérésnél mindegyik talajmintán három ismétlést végeztem el. A szerves széntartalmat Scheibler-féle kalciméteres méréssel (ROWELL 2014), szintén három ismétléssel határoztam meg. A mérések mind tömegszázalékos arányban lettek kifejezve. A szerves szén koncentrációja az alábbi képlet (1) alapján lett meghatározva:

$$OC_{cc} = TC_{cc} - IC_{cc} \quad (1)$$

ahol TC_{cc} a mintában megtalálható teljes széntartalmat, IC_{cc} a mintában karbonátként megtalálható szerves széntartalmat, OC_{cc} pedig a mintában megtalálható szerves eredetű széntöménységet jelöli. A CN arány számítása az átlagok alapján a következő képlet (2) felhasználásával történt:

$$k_{CN} = \frac{\frac{TN_{cc} \cdot m_s}{M_N}}{\frac{OC_{cc} \cdot m_s}{M_C}} \quad (2)$$

ahol k_{CN} a szén-nitrogén arány a talajmintában, a OC_{cc} a minták szerves széntartalma, az m_s a bemért minta tömege, az M_C a szén moláris tömege, a TN_{cc} a minták összes nitrogéntartalma, valamint az M_N a nitrogén moláris tömege.

4.4.2. Frakcionált talajminták

A következő mérések egy módosított ZIMMERMANN-féle frakcionálási módszerrel méret szerint elkülönített mintákból származnak (POEPLAU et al., 2013). A szétválasztás során 63 μm -

es fémszítán nedves szítálással el lett választva egymástól a két frakció. A szítán fennmaradó frakciót homoknak (S) és aggregátumoknak (A), továbbiakban „aggregátumok” vagy „SA”; a desztillált vízzel átfolyót pedig iszapnak (s) és agyagnak (c), továbbiakban „sc” tekintetem. Az SA tartalmazta a POM frakciót is. Ez nem került elválasztásra. A szétválasztáshoz egységesen 1010 g talajmintát használtam fel, majd az egyes frakciók tömegét megmértem. Ebből ki tudtam számolni egyfajta aggregátumstabilitást, melyhez a következő képletet (3) használtam fel:

$$S_A = \frac{SA}{sc + SA} \quad (3)$$

ahol S_A az aggregátum stabilitás egy kifejezett értéke, SA a homok és az aggregátum frakció, sc pedig a kőzetliszt és agyag frakció. Az összes frakcionált mintára szintén CHNS elemanalizátoros méréssel lettek meghatározva az egyes alkotók. Az sc minták mennyisége miatt a szervesetlen szén meghatározására a gáztérfogatos mérés helyett SSM-5000A berendezést használtam. A mérőműszerben lejátszódó folyamat során 250 °C-on tömény foszforsav jelenlétében szabadul fel a karbonát úgy, hogy közben nem roncsolja a szerves anyagot. A keletkező szén-dioxidot egy infravörös detektorral méri meg.

Az OM összetételét Fourier-transzformációs infravörös (FTIR) spektroszkópiával (Vertex 70) DRIFT üzemmódban, RT-DLaTGS detektorral (Bruker, USA) becsültem. A frakcionált minták a mérések előtt egy éjszakán át 105 °C-on száradtak. A szórt visszaverési spektrumokat 4 cm⁻¹ felbontással nyertem a 400–4000 cm⁻¹ tartományban. Minden egyes különálló minta háromszor lett megmérve. Az FTIR nyers spektrumait a légköri nedvesség- és CO₂-tartalommal javítottam, majd alapvonal-korrekción alkalmaztam a Bruker Opus 8.1 szoftver segítségével (Szabó et al., 2020). A releváns szerves sávok az irodalom és a görbék spektrális jellemzői alapján lettek beazonosítva. Az alifás C-tartományt 2960–2840 cm⁻¹-ben határoztam meg (Lehmann és Solomon, 2010), az aromás C-tartományt pedig 1680–1580 cm⁻¹-ben (Demyan et al., 2012). Az 1175–1148 cm⁻¹-nél lévő sáv az éterekre (Egli et al., 2010), míg az 1465–1360 cm⁻¹-nél lévő sáv az alifás C–H kötésre és a fenolos ligninre utalnak. A továbbiakban az éterkötésekkel rendelkező tartományt poliszacharidoknak, az alifás C–H kötések és a fenolos lignineket ligninnek fogom nevezni az egyszerűség kedvéért. Az 1547–1510 cm⁻¹-nél lévő sávot az amidok jellemzésére különítettem el. (Lehmann és Solomon, 2010). Az egyes sávoknál a görbe alatti területet számszerűsítettem. A helyi alapvonalat az adott tartomány két végpontja közötti távolságként határoztam meg. Ezután az egyes sávokat a teljes területhez viszonyítottam a következőképpen:

$$VST = \frac{\text{adott sáv területe}}{\text{összes terület összege}} \quad (4)$$

ahol VST az a viszonyított sávterület. Az aromássági mutatót, mely az aromás vegyületek arányát hivatott visszaadni Veum et al. 2014 alapján a következőképpen számoltam ki:

$$\text{Aromásság} = \frac{VST_{1680-1580}}{(VST_{2960-2840} + VST_{1465-1360})} \quad (5)$$

ahol az „Aromásság” az aromássági mutatóra, a VST_{1680–1580} az aromás kötésekkel rendelkező széntartomány viszonyított sávterületére, a VST_{2960–2840} az alifás széntartomány viszonyított sávterületére és a VST_{1465–1360} az alifás szén-hidrogén kötések és a fenolos lignin tartomány viszonyított sávterületére utalnak. Ez a mutató ad egyfajta rálátást az ásványosodás mértékére. Másik ilyen mutató a szén és az oxigén funkciós csoportjainak aránya, mely a következőképpen számítható ki (Yeasmin et al. 2020):

$$C/O = \frac{(VST_{2960-2840} + VST_{1680-1580} + VST_{1547-1510} + VST_{1465-1360})}{VST_{1175-1148}} \quad (6)$$

ahol C/O a szén és az oxigén funkciós csoportjainak aránya, VST_{hullámszám-hullámszám} pedig az FTIR módszert röviden bemutató bekezdésben szereplő tartományok viszonyított sávterületei. Ez az ásványosodás másik közvetett mutatója.

4.5 Statisztikai számítások

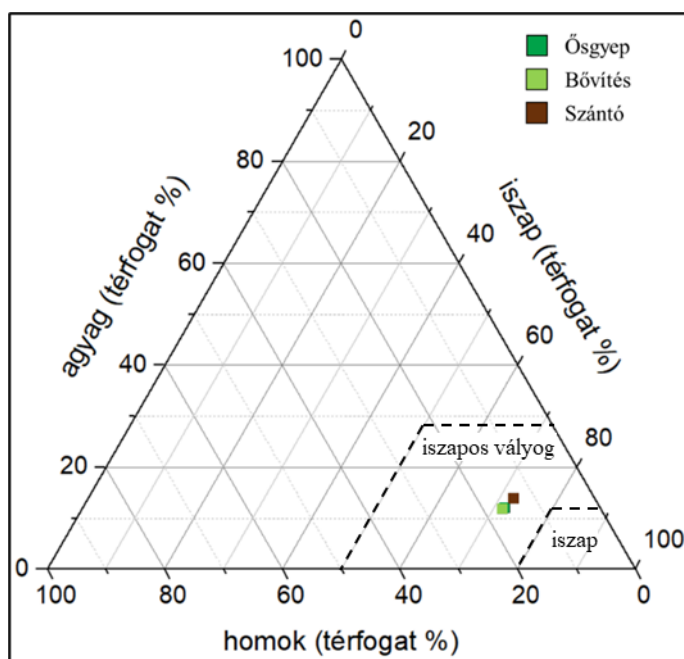
Az adatok elemzését a Microsoft Excel táblázatkezelő és az R program 4.0.5 változatának R Studio szoftvereiben végeztem el. A mérések és az előzetes számítások során megkapott adatok felhasználásával az egyes vizsgálati szempontok alapján dobozábrákat készítettem mindhárom területet (ösgyep, bővítés, szántó) ábrázolva. Ezeket az ábrákat az adatok eloszlása és az esetleges kiugró értékek kiszűrése okán készítettem. Ezután az adatok átlagainak felhasználásával – ezek számítanak csak egymástól független mintáknak – az egyes csoportok eloszlását vizsgáltam meg Shapiro–Wilk próba alkalmazásával. Az egyes csoportok a területhasználatok (ösgyep, bővítés, szántó) voltak. A Shapiro–Wilk próba az R Studioban megtalálható legérzékenyebb teszt a normál eloszlás vizsgálatára, ami pedig az egyik

előfeltétele a varianciaanalízis használatának. Az adataim átmentek a próbán, így tudtam alkalmazni rájuk az ANOVA módszertanát. A vizsgálat során 95 %-os megbízhatósági szintet használtam. Az egyes csoportok egymáshoz viszonyított különbsége megismerése céljából lefutattam a TukeyHSD próbát is az összes adatra. Egyes tulajdonságoknál (pH; EC; TN; aggregáltság) Pearson-féle korrelációt és lineáris regressziószámítást is végeztem, hogy meg tudjam ezen tulajdonságok mennyire függenek össze a talaj OC tartalmával, illetve mennyiben magyarázzák azt. Az utóbbi számítások azonban nem tükrözik a vizsgált folyamat időbeliségét, csupán a térbeli eltérések alapján mutat összefüggéseket, melyeket sok tényező befolyásol, így óvatosan kell kezelni ezeket az eredményeket, mivel pillanatnyi állapotot tükröznek.

5. Eredmények

5.1. A talaj alaptulajdonságai

A három területhasznosítási mód talajai a fizikai féleség terén teljesen megegyeztek mely az iszapos vályog (6. ábra). A homok szemcseméret aránya a szántóban volt a legkisebb (13,6 %) és a bővítésben a legnagyobb (16,6 %). Az agyag és az iszap aránya a szántóban a legnagyobbak (14; 13,6 %) és a bővítésben pedig a legkisebbek (11,8; 71,6 %) voltak. Az egyes művelésmódok közötti különbségek nem voltak szignifikánsak.



7. ábra. A szemcseméret-elemzés eredményei ábrázolva az USDA talajszerkezeti osztályának meghatározásához.

A három terület talajainak kémhatása között szignifikáns különbség volt, de lényegében mind a desztillált vizes, mind pedig a KCl-os mérés alapján az ösgyep és a bővítés semleges, gyengén savanyú; a szántó pedig gyengén savanyú és savanyú kémhatású volt (1. táblázat). Az ösgyep és a bővítés talajában 5,7-es pH_{KCl} körüli értékek esetében volt legnagyobb a SOC mennyisége. Az ösgyep és a szántó talajában gyenge kapcsolat figyelhető meg a SOC tartalom és a pH_{KCl} közt, míg a bővítésnél még gyenge kapcsolat sincs. A desztillált vizes mérés esetében a szántó és a bővítés SOC értékei 6,6-os pH-nál volt a legnagyobbak, míg az ösgyepnél ennél valamivel kisebbek voltak az értékek (~6,6-os). Azonban elég gyenge kapcsolat állt fent (ösgyep, szántó) vagy éppen nem is volt kimutatható kapcsolat (bővítés) a $\text{pH}_{\text{H}_2\text{O}}$ és a SOC tartalom között.

Az elektromos vezetőképesség (EC) az ösgyepnél ($164 \pm 39 \mu\text{S}$) volt a legnagyobb, szorosan ezt követték a szántó mintái ($156 \pm 84 \mu\text{S}$). A legkisebbek pedig a bővítés értékei ($114 \pm 33 \mu\text{S}$) voltak. Jelentős különbség azonban sem a csoportok között, sem pedig az egyes

párok tagjai között nem volt megfigyelhető. A bővítés mintáinál volt értékelhető kapcsolat a SOC és az EC között, az ősgyepnél ez elég gyenge, a szántónál pedig semmilyen nem volt.

A teljes nitrogéntartalom meglepő módon a szántó mintáinál volt a legkisebb (0,24 %) (1. táblázat). A párokat vizsgálva egyedül a szántó és a bővítés értékei – melyek elég kicsik voltak az ősgyephez képest – között nem volt jelentős a különbség. A legnagyobb értékekkel rendelkező ősgyep (0,35 %) mintái viszont lényegesen nagyobb különbséget adtak a másik két terület mintáival összehasonlítva. A TN és a OC kapcsolatát elemezve megállapítható, hogy támogató kapcsolat áll fenn az ősgyepnél ($R^2 = 0,4$), valamint igen erős a bővítésnél, ami pedig 80 %-os összefüggést jelentett ($R^2 = 0,8$) a lineáris trend alapján.

A szervetlen széntartalom alacsony volt (0,39 – 0,79 %) mindhárom terület talajában (1. táblázat). Ennek ellenére jelentős különbség mutatkozott a területek között. A legnagyobb különbség a szántó és az ősgyep között volt ($p = 0,002$) a szántó (0,69 %) javára.

Az összes széntartalom átlagai a következőképpen alakultak: A legnagyobb értéket (3,8 %) az ősgyep tudhatja magáénak, ennél jóval kisebbek voltak a bővítés (2,8 %) – és a bővítéstől alig elmaradó szántó (2,5 %) értékei (1. táblázat). A szerves széntartalom értékei, melyeket a 4.4 alfejezet alapján számítottam a következőképpen alakultak: a legnagyobb még így is az ősgyep (3,3 %) maradt, ezt követte sokkal lemaradva a bővítés (2,2 %) és a szántó (1,8 %). Az egyes területek között jelentős különbség volt ($p < 0,01$) és ez az egyes párok között is megmutatkozott. A legkisebb különbség a szántó és a bővítés között volt megfigyelhető ($p = 0,02$).

A szén-nitrogén arány az ősgyepben volt a legnagyobb (11 : 1) és a szántóban a legkisebb (8,6 : 1) (1. táblázat). A három terület között e mutató terén szignifikánsak voltak a különbségek ($p < 0,01$), A legnagyobb különbség az ősgyep és szántó között mutatkozott ($p < 0,01$), míg a bővítés és az ősgyep között az eltérés nem volt szignifikáns.

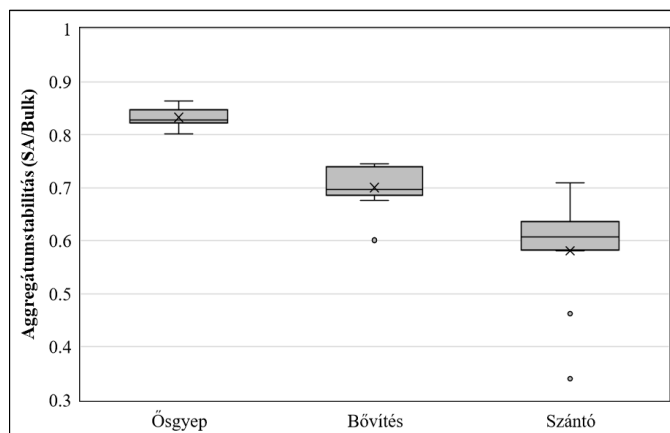
1. táblázat. A talajok általános tulajdonságai területhasználatonként (átlageredmény, szórásokkal, $n = 9$).

	pH _{KCl}	pH _{H₂O}	EC [μS]	TN [m/m%]	IC [m/m%]	TC [m/m%]	OC [m/m%]	C:N [mol/mol]
Ősgyep	6,0±0,35	6,5±0,26	163,57±39	0,35±0,02	0,54±0,07	3,80±0,29	3,3±0,27	11,0±0,44
Bővítés	5,6±0,18	6,7±0,10	114,11±23	0,25±0,02	0,60±0,12	2,81±0,37	2,2±0,46	10,3±1,34
Szántó	5,2±0,11	6,3±0,15	156,24±84	0,24±0,01	0,69±0,06	2,48±0,05	1,8±0,08	8,6±0,39

5.2. A talajok aggregáltsága, a frakciók szerves anyagának tényezői

Az ősgyep talajában volt a legnagyobb az aggregátumok (SA) aránya (84 %), mely osztályozás a 63 μm-nél nagyobb szemcseméretet takarja. A bővítés és a szántó talajában ez az

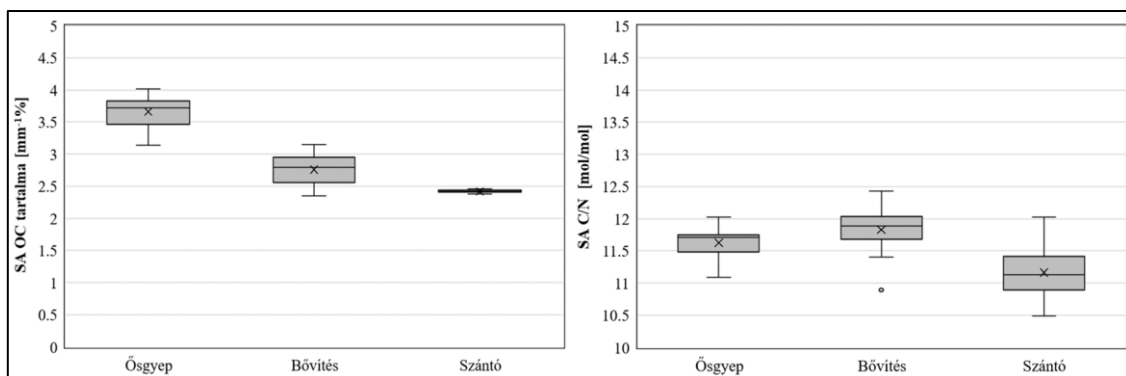
érték 70, illetve 56 százalék volt. Az egyes területek közötti különbség statisztikailag jelentős volt, valamint a párba állítások is ugyanilyen eredményt hoztak ($p < 0,05$). A legkisebb különbség a szántó és a bővítés között volt megfigyelhető. A szántónál meglepő módon nagy lefelé kiugró értékek jelentek meg (8. ábra). A szerves szén és az aggregátumstabilitás közötti gyenge kapcsolat csak az ősgyepnél volt, de ez is csak viszonylag kis mértékben magyarázta ($R^2 = 0,2$) a szerves szén értékeket. A bővítésnél elhanyagolható, a szántónál pedig semmilyen kapcsolat nem mutatkozott.



8. ábra. Az egyes területhasználat talajainak aggregáltsága

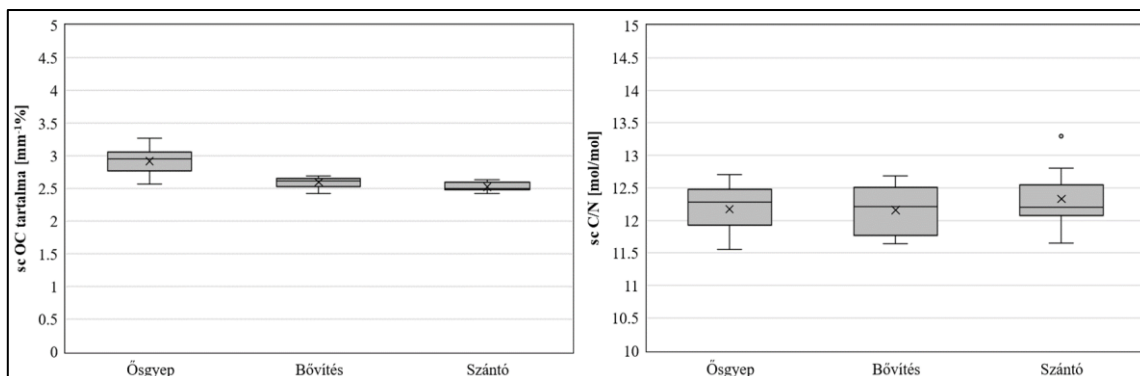
A frakciókon elvégzett mérések átlageredményeit a 2. táblázat tartalmazza.

Az aggregátumok OC tartalom értékei szintén az ősgyepben (3,7 %) voltak a legnagyobbak és a szántóban (2,4 %) a legkisebbek, szignifikáns különbségekkel. A szántó és a bővítés értékei között volt a legkisebb eltérés ($p > 0,01$). A TN – hasonlóan az teljes talaj eredményeihez – az ősgyep aggregátumaiban volt a legnagyobb (0,37 %), a bővítés (0,27 %) és a szántó (0,26 %) között pedig kis eltérés volt megfigyelhető. Szignifikáns különbség csak az ősgyep és a másik két területhasználati mód aggregátumai között mutatkozott. Az SA frakció CN aránya a következőképpen alakult: bővítés (11,8 : 1), ősgyep (11,6 : 1), szántó (11,1 : 1). Az SA frakciójában a CN arány szignifikáns különbséget mutatott a három területet együtt figyelve. Azonban az ősgyep-bővítés párok értékei ($p = 0,3$) nem mutattak jelentős eltérést (9. ábra).



9. ábra. Az aggregátumoknak (SA) szerves szén (OC) értékei balra és a C:N jobbra.

A 63 μm -nél kisebb frakció, tehát az sc minták szerves széntartalma szintén az ösgyepben volt a legnagyobb (2,9 %), majd a bővítés (2,6 %) és szántó (2,5 %) következett. A területek közötti eltérés jelentős volt, bár ez a bővítés-szántó párra nem volt igaz ($p = 0,54$). A TN a következőképpen alakult: ösgyep (0,02 %), bővítés (0,01 %), szántó (0,01 %). Jelentős eltérés pedig szintén csak az ösgyep és a másik kettő területhasználat között mutatkozott. A CN arány így: szántó (12,3 : 1), bővítés (12,16 : 1), ösgyep (12,17 : 1) alakult. Az sc frakcióban a területek között nem volt jelentős különbség ($p = 0,6$) a CN arányt nézve.



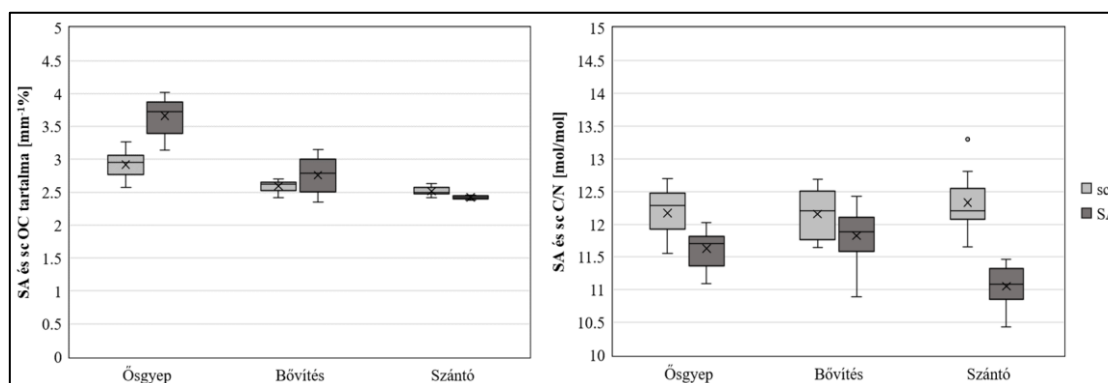
10. ábra. A 63 μm -nél kisebb (sc) frakció szerves szén (OC) balra és a C:N jobbra.

2. táblázat. A frakciók szerves szén és szén-nitrogén értékei (átlag és szórás, $n = 9$).

	Aggregátumok (63 μm <)			Finom frakció (63 μm >)		
	OC [m/m%]	TN [m/m%]	C:N [mol/mol]	OC [m/m%]	TN [m/m%]	C:N [mol/mol]
Ösgyep	3,66 $\pm$ 0,29	0,37 $\pm$ 0,02	11,6 $\pm$ 0,32	2,92 $\pm$ 0,22	0,28 $\pm$ 0,02	12,2 $\pm$ 0,40
Bővítés	2,76 $\pm$ 0,27	0,27 $\pm$ 0,02	11,8 $\pm$ 0,44	2,59 $\pm$ 0,09	0,25 $\pm$ 0,01	12,2 $\pm$ 0,42
Szántó	2,44 $\pm$ 0,05	0,26 $\pm$ 0,01	11,1 $\pm$ 0,32	2,53 $\pm$ 0,07	0,24 $\pm$ 0,01	12,3 $\pm$ 0,47

Az egyes területhasználatok terén a talaj aggregátumainak és finom frakciójának OC tartalma között a bővítés kivételével ($p = 0,08$) jelentős különbségek voltak megfigyelhetők ($p_{\delta} < 0,01$; $p_{sz} < 0,01$). Az ösgyepnél jelentősen kisebb volt a stabil raktár (finom frakció) OC

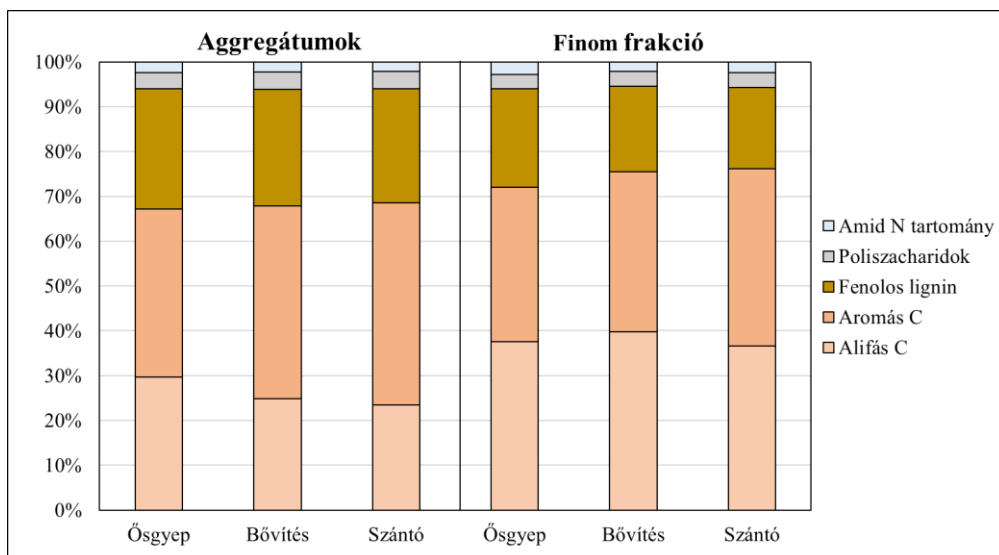
tartalma, mint az mobilis raktár (aggregátumok) OC tartalma. A bővítésnél szintén az aggregátumok OC tartalma volt nagyobb, de nem jelentősen, míg a szántónál fordítva volt, bár különbség nem volt nagy (11. ábra). A TN tartalom szignifikánsan (és nagyságrendileg is) nagyobb volt ($p < 0,01$) mindegyik területhasználatnál az aggregátumokban, mint a finom frakcióban. A CN arány terén szintén csak az ősgyepnél ($p < 0,01$) és a szántónál ($p < 0,01$) volt jelentős eltérés az aggregátumok és a finom frakció CN aránya között. Mindhárom területhasználat alatt a finom frakció CN aránya volt a nagyobb ($p = 0,1$). A legnagyobb különbség pedig a szántónál volt megfigyelhető.



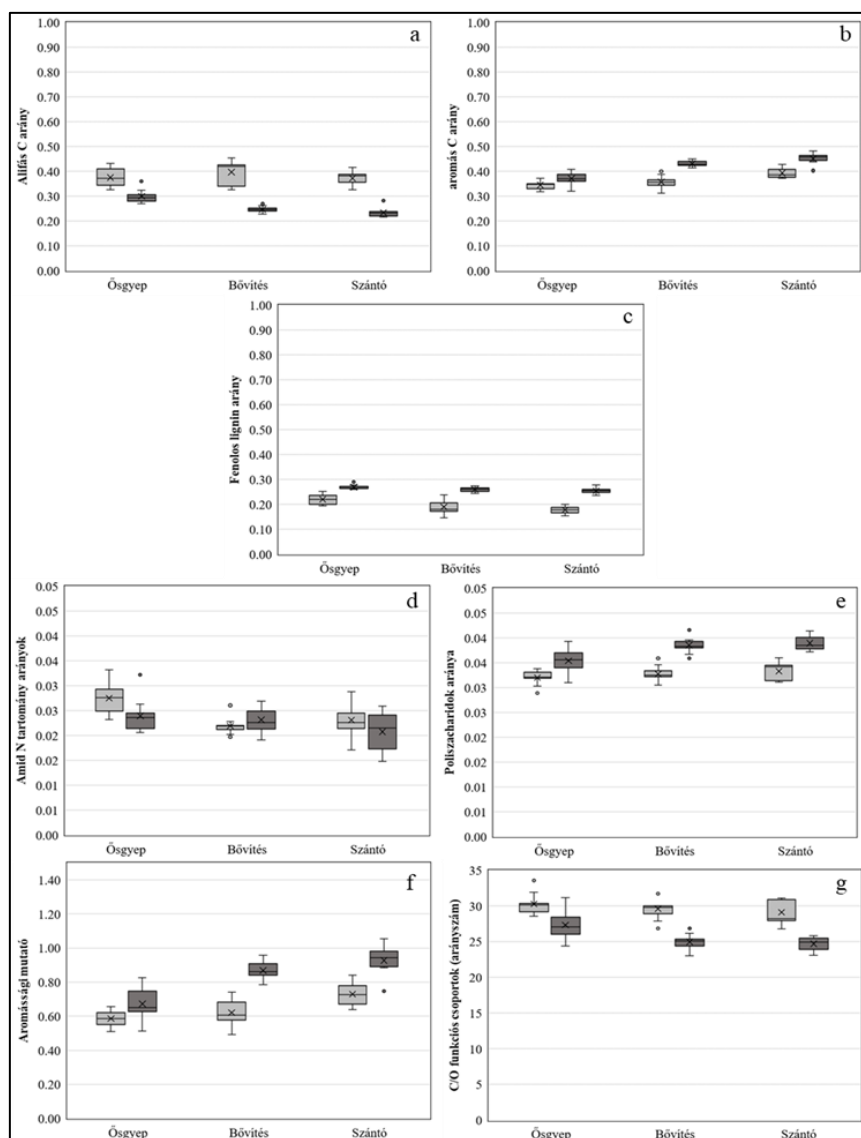
11. ábra. Az finom frakció (sc) és az aggregátumok (SA) OC tartalma [mm⁻¹%] és CN aránya.

5.3. A talajok szerves anyagösszetétele

A talajok szerves anyagösszetételét a 12. és a 13. ábrán szemléltetem, mely eredmények a módszertanban ismertetett FTIR elemzés alapján születtek. Szépen kitűnik, hogy az aggregátumok nagyobb arányban tartalmaznak aromás C kötések, mint a finom frakció. Az alifás alkotók ezzel szemben a finom frakcióban vannak többségben. Fenolos lignint és poliszacharidokat az mobilis frakció tartalmaz nagyobb arányban. A poliszacharidok, az aromás C arány és így nem is olyan meglepő módon az aromassági mutató terén is a következő sorrend állítható fel: szántó > bővítés > ősgyep. A többi mutatónál nincs ilyen szemléletes különbség, egyedül az ősgyep amid N részaránya emelkedik ki. A 3. táblázat az ábrán szereplő adatszoportok különbözőségét ($p < 0,05$) mutatja be. Az amidos N kivételével az aggregátumok és a finom frakció között jelentős különbségek mutatkoztak a szerves anyagösszetétel tekintetében. Egyedül az alifás C kötésnél és a C/O funkciós csoportok arányánál kaptam nagyobb értékeket a finom frakcióban az aggregátumokhoz viszonyítva.



12. ábra. A frakciók szerves anyagösszetétele területhasználatonként százalékos arányban.



13. ábra. A finom frakció (világosszürke) és az aggregátumok (sötét szürke) szervesanyagának tulajdonságai eltérő területhasználat mellett.

3. táblázat. A szerves anyag összetételének különbségei az egyes területhasználatok között a frakciókon belül és a frakciók között az egyes területhasználatokon belül (SA–aggregátumok; sc–finom frakció). Az ANOVA alapfeltevéseit az adataim felé 95 %-os bizonyossággal vizsgáltam.

Vizsgált paraméter	TukeyHSD próba	Aggregátumok			Finom frakció			Ősgyep	Bővítés	Szántó
		Ősgyep- Bővítés	Bővítés- Szántó	Szántó- Ősgyep	Ősgyep- Bővítés	Bővítés- Szántó	Szántó- Ősgyep	SA–sc	SA–sc	SA–sc
Alifás C arány	p-érték Egyeznek?	< 0,01 nem	0,47 igen	< 0,01 nem	0,46 igen	0,36 igen	0,98 igen	< 0,01 nem	< 0,01 nem	< 0,01 nem
Aromás C arány	p-érték Egyeznek?	< 0,01 nem	0,16 igen	< 0,01 nem	0,48 igen	< 0,01 nem	< 0,01 nem	0,03 nem	< 0,01 nem	< 0,01 nem
Fenolos lignin arány	p-érték Egyeznek?	0,19 igen	0,54 igen	0,02 nem	0,03 nem	0,50 igen	< 0,01 nem	< 0,01 nem	< 0,01 nem	< 0,01 nem
Amid N tartomány (arányszám)	p-érték Egyeznek?	0,87 igen	0,33 igen	0,15 igen	< 0,01 nem	0,68 igen	0,02 nem	0,05 nem	0,26 igen	0,22 igen
Poliszacharidok aránya	p-érték Egyeznek?	0,01 nem	0,91 igen	< 0,01 nem	0,65 igen	0,78 igen	0,28 igen	< 0,01 nem	< 0,01 nem	< 0,01 nem
Aromássági mutató	p-érték Egyeznek?	< 0,01 nem	0,12 igen	< 0,01 nem	0,67 igen	0,01 nem	< 0,01 nem	0,04 nem	< 0,01 nem	< 0,01 nem
C/O funkciós csoportok arányszám	p-érték Egyeznek?	0,01 nem	0,92 igen	< 0,01 nem	0,65 igen	0,80 igen	0,30 igen	< 0,01 nem	< 0,01 nem	< 0,01 nem

6. Az eredmények értékelése

A vizsgált talajok azonos éghajlaton, kistájon és tengerszint feletti magasságon fekszenek, fizikai féleségük megegyezik. Ez azt jelenti, hogy jellemzően az OC megkötésére és tárolására ható „külső”, környezeti körülmények közel megegyeztek és azonos területhasználat esetén közel azonos értékűek lehetnek.

A tíz mintás mintavétel és a háromszoros mérések kimutattak egy hasznos megfigyelést, melyből fontos megállapítás következik. A szántó mért értékeinél az ábrák nagyrésznél (lényegében az EC-t és a CN arányokat kivéve) megfigyelhető az értékek összetartása, nagyobb szórás hiánya. Ez arra utal, hogy a szántóterület nem csak vizuálisan számít egyneműnek, hanem a paraméterek nagy részénél, főleg a szerves anyagok terén. Ez a szórásokat kiszámítva is látványos (1. táblázat). Ugyanez a másik két területhasználatnál nem figyelhető meg.

A feltalaj TC-nál kitűnt, hogy a bővítés feltalajának széntartalma – a művelés megszűnésének hatására – elkezdett emelkedni, ha feltételezzük, hogy 12 évvel ezelőtt szinte azonos volt a szántó értékével. A széntartalom növekedése ráadásul jelentősnek mondható ($p = 0,03$). A szervesetlen szénttartalmat levonva – mely a szántónál volt a legnagyobb és az ösгыepnél a legkisebb – még inkább kirajzolódik a különbség. Tehát a növekmény szerves eredetű volt. A bővítés feltalajának OC értéke már nagyobb különbséget mutatott ($p = 0,02$) a szántó és a bővítés között, ugyanezen területhasználati módok a TC értékekeinél ($p = 0,03$). Tizenkét év alatt látványos széntöbblet keletkezett a bővítésben, ám ez az idő kevés volt ahhoz, hogy a természetes állapotú feltalaj (ösгыep) OC értékét elérje. POEPLAU és DON (2013) kutatásában, mely Észak-Európa szinte több területet vizsgált ugyanilyen szempontból több, mint 40 év alatt állt be az eredeti, nagyobb OC egyensúlyi állapot. Az általam vizsgált feltalajban az eredeti (ösгыep OC tartalma) szerves széntartalom több, mint negyede (28 %) áramlott vissza. Ha feltételezzük, hogy egy lineáris (valójában feltételezhetően hatvány (5. ábra)) összefüggés alapján halmozódik fel a OC a feltalajban, akkor még 3,5-szer ennyi idő szükséges az új egyensúlyi állapot eléréséhez. Ez az időtartam (~50 év) szinte megegyezik POEPLAU és DON (2013) által tapasztaltakkal. Tehát az elmozdulás az új, nagyobb OC egyensúlyi állapot felé elkezdődött, de – feltételezhetően – korántsem ért véget. A széntöbbletet nagy bizonyossággal az állandósult növényzettel járó szerves anyagutánpótlás (nincs betakarítás) és a bolygatás (O_2 bevitel) elmaradása adhatta.

A vizsgált talajtényezők hatását a feltalaj OC tartalmára a következők alapján lehet értékelni. A szántó feltalaja kissé savanyúbb volt, amely akár nagyobb OC tartalomra is utalhat

(PONGE 2003) és a mikrobiális szervesanyag nagyobb arányú jelenlétére. Azonban ez megtévesztő lehet, mert csak a pH_{KCl} -nél volt egyértelműbb az ennyivel kisebb kémhatás. Ez inkább a műtrágyahasználat miatt alakulhatott így. Az ösгыep mindkét pH mérés esetében elég nagy terjedelmet mutatott, mely a változatos és eltérő növényzetre utalhat. Az elektromos vezetőképesség nagy szórása a szántónál az egyes mintavételi pontokban jelentkező nagyobb sótartalmat jelentheti. Ez azonos a BARCZI és munkatársai (2011) által beazonosított szikesebb részekkel. Emellett a terület többi részén az elektromos vezetőképességet befolyásoló sótartalom nem utal szikedésre. Mivel nem voltak szignifikáns különbségek és az értékek sem utalnak a terület túlnyomó részén szikedésre, így az EC hatása a OC-ra sem lehet valami nagy. A bővítésnél viszont mérhető összefüggést adott a regresszió-elemzés ($R^2 = 0,31$). Ez a terület kis mértékű változékonyságára utal. Ami a leginkább együtt mozgott a bővítés mintáinál az OC tartalommal az a TN tartalom volt. Az ösгыepnél egy gyenge kapcsolat volt kimutatható, a szántónál pedig nem állt fenn kapcsolat. Ez összevetve azzal, hogy a TN tartalom a szántóban volt a legkisebb azt jelentheti, hogy a kevesebb O_2 bevitel jobban megőrizhette a talaj szerves anyag (OM) tartalmát, tehát a talajbaktériumoknak nem volt lehetőségük felhasználni a nitrogént és a szenet. Más kutatásokban (BOTOS et al. 2017; GOSLING et al. 2017) viszont a N tartalom a szántókban volt a legnagyobb, főleg a N-műtrágyázásnak és az esetlegesen hüvelyesekkel együtt élő Rhizobium baktériumoknak köszönhetően. A bővítésben tehát már a nagyobb növényi maradványokból származó OM adhatja a OC és a TN nagyobb részét, ellentétben a szántóval, ahol bár feltételezhetően kisebb a talajélet, a mikrobiom mégis nagyobb arányban járulhat hozzá a talaj szerves anyagához az kisebb szerves anyag tartalom miatt. Ezt alátámaszthatja a CN arány is, mely a szántóban ($8,6 \pm 0,39$) volt a legkisebb, mely jobban közelít a mikrobiom CN arányához. Az elmélet megerősítéséhez és pontosításához hasznos volt elemezni egy független vizsgálat, az FTIR mérés eredményeit mely hasznos adatokkal szolgál a OM összetételéről, azok kötéseinek elemzése révén.

A frakcionálás eredményei rávilágítottak arra, hogy a művelés felhagyásával a OC felhalmozódás főleg az aggregátum frakcióban zajlott le, mely az aggregátumok mellett a POM (szerves törmelék) szerves széntartalmát is lefedi. Ugyanezt mutatta ki POEPLAU és DON (2013), akik ráadásul elválasztották a POM-ot az aggregátumoktól. Ennek ellenére náluk is az aggregátumokban tárolt OC-t befolyásolta legjobban a területhasználat jellege, így valószínűsíthető, hogy Külső-Gulyán (Battonya, Tompapusztai-lőszыep) is az aggregátumokban tárolódott szerves szén lehet a fő felhalmozódási forrás. Az aggregátum frakció gyors reagálása a területhasználat-változásra azért lehet jelentős, mert mindegyik területhasználatnál az aggregátumok tettek ki nagyobb arányt. A bővítésben ez az arány

emelkedett és az ősgyep felé mozdult el. Tizenkét év alatt az aggregátumstabilitás több, mint felére emelkedett az eredeti állapothoz képest, ami azt jelenti, hogy ha ismét lineáris trendet feltételezünk, akkor a felhagyástól számított 25 év múlva a bővítés aggregátumstabilitása nem fog különbözni az ősgyepétől. ZHANG és munkatársai Kínai-löszfennsíkon végzett kutatása alapján – eltérő külső körülmények mellett – mindössze 12 év alatt érte el a természetes állapot aggregátumstabilitási szintjét a felhagyott művelésű terület talaja. Igaz ennél a kutatásnál elképzelhető, hogy még nem állt be a szántás okozta kisebb OC egyensúlyi állapot, így feltételezhetően az aggregátumok sem estek szét annyira, tehát valószínűsíthetően nagyobb kezdőértéktől indult. A finom frakció OC tartalmánál is volt elmozdulás, bár ez nem volt jelentős, így kijelenthető, hogy a könnyebben hozzáférhető szénkészlet indult növekedésnek. Ezt támasztja alá az a tény is, hogy a szántó feltalajában a nehezebben hozzáférhető OC (ásványi fázishoz kötött) nagyobb arányú volt, mint az aggregátumokban tárolt. Ezzel szemben a bővítésben már nem volt jelentős különbség a szénraktárak között. Ez azért is lehet érdekes, mert ha az ősgyep és a szántó szénraktárait figyeljük, akkor minden bizonnyal a szántóterület első megművelése óta nem csak az aggregátum frakcióban, hanem az ásványi fázishoz kötött frakcióban tárolt OC tartalom is csökkent. Ezzel szemben a visszaépüléskor elsőként a könnyen elérhető tárolókban mutatkozik a OC felhalmozódás. A TN tartalom két frakció közti nagyságrendbeli eltérése azt jelentheti, hogy a teljes feltalaj TN tartalmát szintén az aggregátum frakció befolyásolta. Ez ismét több növényi maradvány jelenlétére utal a nagyobb aggregátum aránnyal rendelkező területhasználatoknál. Az aggregátumokban és a finom frakcióban is az ősgyep TN tartalma jelentősen nagyobb volt a másik két területhasználat ugyanezen értékénél. Ez arra utalhat, hogy bár a bővítésben az aggregátumok OM tartalma közeledik az eredeti állapothoz, még jóval kevesebb TN tartalommal rendelkezik. Ezért a TN tartalom feltételezhetően korlátozó tényezőnek is számít az átmenetnél, ahogy azt az ömlesztett feltalaj OC és TN kapcsolatánál láthattuk. A CN arányt a bővítésnél és a szántónál szinte kizárólag az OC tartalom befolyásolta. Ez és az ősgyepben megmutatkozó nagyobb TN tartalom következtében fordulhatott elő, hogy a CN arány semelyik frakcióban, így a teljes feltalajban sem különbözött az ősgyep és a bővítés között. Feltételezhető, hogy az új egyensúlyi állapot beállásakor a bővítésben is megemelkedik majd a TN tartalom a CN arány jelentősebb változása nélkül, de ennek bizonyítására, majd az új egyensúlyi állapot beálltakor érdemes lefolytatni egy hasonló vizsgálatot.

A természetes állapotba visszaalakított talaj szerves anyagösszetételét, nem roncsoló eljárásokkal, elég kevesen kutatták a nemzetközi szakirodalom alapján. Így a munkám ilyen téren is hozzátesz a tudásunk gyarapításához. Ez a vizsgálat némi többletinformációt

szolgáltatott például az ősgyep nagyobb TN tartalmát illetően. Feltételezhetően ezt a többletet nagy részben az amidos N tartomány szolgáltatja (13. ábra „d” diagram). Ezzel szemben a CN arány alakulására kevésbé adott magyarázatot a Fourier transzformációs vizsgálat. Ebből a megállapításból pedig arra lehet következtetni, hogy a FTIR eredményei és a CN arány nem feltétlenül függenek össze, nem következik egyikből a másik. A C/O funkciós csoportok eredményei alátámasztották az általános vélekedést miszerint a finom frakcióban, melyet a tartósabb raktárnak vélnek (LUGATO et al. 2021; LUO et al. 2017; POEPLAU–DON 2013) a talajélőlények számára könnyebben hozzáférhető O- funkciós csoportok a C- funkciós csoportokhoz képest kisebb arányban vannak jelen. A tartósabb raktár (sc) a szántó aggregátumai és a finom frakció értékek közötti jelentős különbséget is figyelembe véve is beigazolódni látszik. Ezt viszont nem támasztja alá az aromassági mutató (13. ábra „f” diagram), mely az aggregátumokban jelez nagyobb arányt. Ez nem igazolja a tudományos körökben általánosan elfogadott véleményt, miszerint az aromás vegyületek nehezebb lebonthatósága miatt nagyobb arányban jelennek meg a finom frakcióban, vagyis inkább az alifás C kötések nagyobb számban maradnak meg az aggregátum frakcióban, feltételezve, hogy közel ép ez a raktár. Hasonló eredményt tapasztaltak egy nem rég megjelent kutatásban is JAKAB és munkatársai (2019), akik Szentgyörgyváron egy karbonátmentes vályogtalajon kutattak, hasonló módszerrel. Náluk megoszlanak az eredmények a vizsgált talaj területhasználatát követve, de az aggregátum frakció nagyobb aromassági értékeket képviselt, mint a finom frakció. Ez az erősen kötött (élettanilag ellenálló) finom frakcióra (rSOC) már nem volt igaz, ennél kiugró értékeket tapasztaltak az aromasság terén. Tehát az aggregátum raktár gyors reagálása és mozgékonyága beigazolódott, viszont a szerves anyagösszetétele kérdéseket vet fel, főleg a bővítés aggregátum frakcióját illetően.

6. Következtetések

Kutatásomból egyértelműen látszik a hagyományos talajművelés kedvezőtlen hatása a talaj szerves széntartalmára. A vizsgálatok kimutatták, hogy a szántás hatására mind a könnyen hozzáférhető (POM és aggregátumok), mind pedig a nehezebben hozzáférhető (finom frakció) tárolók széntartalma lecsökken. A 12 év viszont elegendő volt arra, hogy jelentős növekedés (28 %-os) legyen megfigyelhető a művelés alól kivont talajban. A szerves szénfelhalmozódás a könnyen elérhető aggregátumokban következik be, a finom frakció ennyi idő alatt nem reagál. Az eltérő megközelítésekben vizsgált szerves anyag összetétel eredmények nem feltétlenül egybehangzóak. A szántóban a szerves anyag összetétele szempontjából a tartósabbnak tekintett, aromás C kötésekkel rendelkező vegyületek vannak jelen nagyobb arányban és ahogy kevesebb a talaj bolygatása úgy nő a könnyebben lebontható alifás vegyületek aránya.

A művelés felhagyásakor jelentkező szerves anyagfelhalmozódást körülmények sokasága befolyásolja. A folyamatot befolyásoló tényezők egymásra gyakorolt hatása és összetettsége miatt még mindig eltérő eredmények születnek, melyek akár ellent is mondhatnak az általános vélekedésnek. Ezeket a felmerülő kérdéseket részletesebb és nagyobb számú vizsgálat segítségével lehet és szükséges orvosolni. Ez megteremti a lehetőséget egy olyan megoldási lehetőség tökéletesítésére, mely több célt is betölthet, például természetvédelmi jelentőséggel is bírhat. Mellesleg a csökkentett talajmozgatásra törekvő termőföldek szénmegkötési folyamatát is jobban meg lehet érteni ezáltal. Munkám eredménye pedig azt mutatja, hogy ezen az éghajlaton, ilyen körülmények között érdemes számolni a művelés alól kivont talaj szénmegkötő képességével.

7. Összegzés

Az éghajlatváltozás korunk legnagyobb, világméretű kihívása, mely holisztikus és azonnali, ugyanakkor fenntartható és gazdaságos választ igényel. Dolgozatomban egy természetközeli kezelési lehetőséget, a művelés alól kivont földterületek szénelnyelő képességének kiaknázását vizsgáltam meg.

A talajok állapotát az intenzív művelési eljárások súlyosan lerontották, ennek következtében pedig nagy szénmennyiség veszett el a talajokból. Ezzel a talajok közel egyensúlyi szénháztartása felborult és egy új, kisebb széntartalmú állapot felé mozdult el. A régi egyensúlyi állapot visszaállításának egyik módja a művelés felhagyása az adott területen. E módszerrel elméleti síkon már régóta számolnak, azonban mind a mai napig kevés ismeretünk van a gyakorlat tekintetében főleg a felhagyott talaj szerves széntartalmának összetételéről.

Kutatásomban egy Magyarországon egyedülálló területen vizsgáltam meg egy 12 éve felhagyott művelésű terület, illetve a közvetlen környezetében található szántó és ősgyep talajának szervesanyag tartalmát. A labormunka során egy módosított Zimmerman-féle frakcionálási eljárással elválasztottam egymástól az iszap-agyag és a homok-aggregátum frakciót, így a stabil és a labilis szerves szén mozgására külön-külön nyílt rálátásom. Az általános talajtulajdonságok (szemcseméret-összetétel, pH, EC, CaCO_3 , C:N, TC, TOC) mellett a szervesanyag összetétel becslésére Fourier-TIR vizsgálatnak is alávettem a mintáimat.

A feltalaj szerves széntartalma szignifikánsan növekedett a visszagyepesedés hatására ($\text{OC}_{\text{cc}} = 2,2 \%$) a szántóhoz ($\text{OC}_{\text{cc}} = 1,8 \%$) képest, de még messze nem érte el az ősgyep értékét ($\text{OC}_{\text{cc}} = 3,3 \%$). A növekedés elsősorban a mobilis szervesanyag raktárat érintette, az eltelt idő nem volt elég a stabil raktárak újratöltéséhez. A szántón az aggregátumokban minimális volt az addicionálisan eltárolt szervesanyag, a visszagyepesített terület és különösen az ősgyep esetében az aggregátumok jelentős mennyiségű labilis szervesanyagot tároltak. A CN arány nem függött össze az OM összetételével, ellenben az egyes területhasznosítási módok befolyásolták a szerves anyag összetételét. A szántónál pedig különösen megmutatkozott az művelés okozta egyneműség több tényezőnél is. Összességében, már az eltelt 12 év alatt is jelentős mennyiségű szén kötődött meg a művelés felhagyásával, ugyanakkor a potenciálisan megköthető kapacitást valószínűsíthetően csak 3,5-szer ennyi idő alatt, azaz körülbelül 40 év alatt érhető el!

8. Köszönetnyilvánítás

Szeretnék köszönetet mondani a mintavétel és a laboratóriumi mérések terén nyújtott segítségért a CSFK FTI Sedilab munkatársainak, Nagy Annának, Pék Virágnak, Horváth Zsófiának, Szávai Péternek, valamint Karlik Máténak!

Hálás köszönetemet szeretném kifejezni Madarász Balázsnak a dolgozat lektorálásáért!

A dolgozat nem készülhetett volna el az alábbi pályázatok nélkül:

NKFIH–123953

GINOP–2.3.2–15–2016–00056.

9. Irodalomjegyzék

ATIVIZIG (ALSÓ-TISZA-VIDÉKI VÍZÜGYI IGAZGATÓSÁG) 2021: Adatigénylés útján.

(Adatbázis validálása: 2021. január 31.)

BARCZI, A.–SCHELLENBERGER, J.–JURÁK, P.–HEGYI, T.–PENKSZA, K. 2011: Talajterképezés a Tompapusztai löszgyepen – *Crisicum* 7. pp. 111–127.

BOTOS, Á.–TÓTH, Cs. A.–BALLA, D.–MESTER, T.–NOVÁK, T. J. 2017: Művelésből kivont Tiszántúli kunhalmok talajának változásai – INTERDISZCIPLINÁRIS TÁJKUTATÁS A XXI. SZÁZADBAN A VII., Magyar Tájökológiai Konferencia Tanulmányai Szeged, 2017. 05. pp. 25–27.

BOUCHOMS, S.–WANG, Z.–VANACKER, V.–DOETTERL, S.–OOST, V. K. 2017: Modelling long-term soil organic carbon dynamics under the impact of land cover change and soil redistribution. – *Catena* 151. pp. 63–73.

BRINGEZU, S.–SCHÜTZ, H.–PENGUE, W.–O'BRIEN, M.–GARCIA, F.–SIMS, R.–HOWARTH, W. R.–KAUPPI, L.–SWILLING, M. 2014: ASSESSING GLOBAL LAND USE: BALANCING CONSUMPTION WITH SUSTAINABLE SUPPLY -SUMMARY FOR POLICYMAKERS – United Nations Environment Programme Division of Technology Industry and Economics

BROWN, J. R. 1993: Sanborn Field: A capsule of scientific agricultural history in central Missouri. Missouri Agricultural Experiment Station, Columbia, MO Cit in: Reeves, D. W. 1997: The role of soil organic matter in maintaining soil quality in continuous cropping systems. – *Soil & Tillage Research* 43. pp. 131–167.

BROWN, L. J.–STOBART, R.–HALLETT, D. P.–MORRIS, L. N.–GEORGE, S. T.–NEWTON, C. A.–VALENTINE, A. T.–MCKENZIE, M. B. 2020: Variable impacts of reduced and zero tillage on soil carbon storage across 4–10 years of UK field experiments. – *Journal of Soils and Sediments* 21. pp. 890–904.

BURKE, C. I.–YONKER, C. M.–PARTON, W. J.–COLE, C. V.–FLACH, K.–SCHIMEL, D. S. 1989: Texture, climate, and cultivation effects on soil organic matter content in U.S. grassland soils. – *Soil Science Society of America Journal* 53. pp. 800–805.

CAMPBELL, C.A.–MC CONKEY, B.G.–ZENTNER, R.P.–DYCK, F.B.–SELLES, F.–CURTIN, D. 1995: Carbon sequestration in a Brown Chernozem as affected by tillage and rotation. *Canadian Journal of Soil Science* 75. pp. 449–458.

CARRENHO, R.–KRZYZANSKI, H. C. 2020: Soil carbon sequestration and carbon flux under warming climate. – *Climate Change and Soil Interactions* 27. fejezet pp. 769–794.

CARTER, R. M. 1993: Conservation tillage in temperate agroecosystems. – Lewis Kiadó Boca Raton 390 p.

CENTERI, C. – JAKAB G. – SZABÓ S. – FARSANG A. – BARTA K. – SZALAI Z. – BÍRÓ Z. 2015: Comparison of particle-size analyzing laboratory methods. – *Environ. Eng. Manag. J.* 14.

- CHANG, R.–FU, B.–LIU, G.–LIU, S. 2011: Soil Carbon Sequestration Potential for “Grain for Green” Project in Loess Plateau, China – *Environmental Management* (2011) 48. pp. 1158–1172
- CHEVALLIER, T. 2011: Physical Protection of Organic Carbon in Soil Aggregates. – *Encyclopedia of Earth Sciences Series 4*. pp. 592–595.
- COLEMAN, D. C.–CALLAHAM, M. A. JR.–CROSSLEY, D.A. JR. 2018: Decomposition and Nutrient Cycling. – *Fundamentals of Soil Ecology* (Harmadik kiadás) 5. fejezet pp. 173–211.
- COLEMAN, D. C.–WALL, D. H. 2015: Soil Fauna: Occurrence, Biodiversity, and Roles in Ecosystem Function. – *Soil Microbiology, Ecology and Biochemistry* (Fourth Edition) 5. fejezet pp. 111–149.
- CSATHÓ, A. J.–CSATHÓ A. I. 2009: A battonya-tompapusztai Külső-gulya flóralistája – *Crisicum* 5. pp. 51–70.
- DEMYAN, M. S.–RASCHE, F.–SCHULZ, E.–BREULMANN, M.–MÜLLER, T.–CADISCH, G. 2012: Use of specific peaks obtained by diffuse reflectance Fourier transform mid-infrared spectroscopy to study the composition of organic matter in a Haplic Chernozem. – *Eur. J. Soil Sci.* 63. pp. 189–199.
- ECLESIA, R. P.–JOBAGY, E. G.–JACKSON, R. B.–BIGANZOLI, F.–PINEIRO, G. 2012: Shifts in soil organic carbon for plantation and pasture establishment in native forests and grasslands of South America – *Global Change Biology* (2012), doi: 10.1111/j.1365-2486.2012.02761.x
- EGLI, M.–MAVRIS, C.–MIRABELLA, A.–GIACCAI, D. 2010: Soil organic matter formation along a chronosequence in the Morteratsch proglacial area (Upper Engadine, Switzerland. – *Catena* 82. pp. 61–69.
- ELDOR, A. P. 2016: The nature and dynamics of soil organic matter: Plant inputs, microbial transformations, and organic matter stabilization. – *Soil Biology and Biochemistry* 98. pp. 109–126.
- FILIPPI, P.–FILIPPI R. S.–PRINGLE, J. M. –BISHOP, F.A. T. 2020: A two-step modelling approach to map the occurrence and quantity of soil inorganic carbon. – *GEODERMA* 371.
- FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION OF THE UNITED NATIONS 2017: Global Soil Organic Carbon Map Version 1.0. – INTERGOVERNMENTAL TECHNICAL PANEL ON SOILS
- FU, X.–SHAO, M.–WEI, X.–HORTON, R. 2010: Soil organic carbon and total nitrogen as affected by vegetation types in Northern Loess Plateau of China – *Geoderma* 155 (2010) pp. 31–35
- GANUZA, A.–ALMENDROS, G. 2003: Organic carbon storage in soils of the Basque Country (Spain): the effect of climate, vegetation type and edaphic variables – *Biology and Fertility of Soils* volume 37. pp. 154–162.
- GOSLING, P.–VAN DER GAST, C.–BENDING, G. D. 2017: Converting highly productive arable cropland in Europe to grassland: –a poor candidate for carbon sequestration – *Scientific Reports* 7: 10493 – DOI:10.1038/s41598-017-11083-6
- GUO, L. B.–GIFFORD, R. M. 2002: Soil carbon stocks and land use change. – *Global Change Biology* 8. pp. 345–360.

- HOORMAN, J. J.–MORAES, C. A.–REEDER, R. 2009: The Biology of Soil Compaction. – Ohionline: Ohio State University Extension Elérhetőség: <https://ohioline.osu.edu/factsheet/SAG-10> Megettkintés dátuma: 2021. 02. 11.
- JAKAB G. – FILEP T. – KIRÁLY Cs. – MADARÁSZ B. – ZACHÁRY D. – RINGER M. – VANCSEK, A. – GÁSPÁR L. – SZALAI Z. 2019: Differences in Mineral Phase Associated Soil Organic Matter Composition due to Varying Tillage Intensity. – *Agronomy*. 9. 700.
- JOBÁGY, E. G.–JACKSON, R. B. 2000: The vertical distribution of soil organic carbon and its relation to climate and vegetation. – *Ecological Applications*, 10(2). pp. 423–436.
- JOHN, B.–YAMASHITA, T.–LUDWIG, B.–FLESSA, H. 2005: Storage of organic carbon in aggregate and density fractions of silty soils under different types of land use – *Geoderma* 128. pp. 63–79.
- KHALEDIAN, Y.–BREVİK, C. E.–PEREIRA, P.–CERDÀ, A.–FATTAH, A. M.–TAZİKEH, H. 2017: Modeling soil cation exchange capacity in multiple countries. – *CATENA* 158. pp. 194–200.
- LAL, R. 2004: Soil carbon sequestration to mitigate climate change. – *Geoderma* 123. pp. 1–22.
- LAL, R. 2008: Carbon sequestration. – *Philosophical Transactions of the Royal Society B* 363. pp. 815–830.
- LAL, R.–KIMBLE J. M. 1997: Conservation tillage for carbon sequestration. – *Nutrient Cycling in Agroecosystems* 49. pp. 243–253.
- LANDIA, S.–PAPINIB R.–D’ERRICOC, G.–BRANDIB, G.–ROCCHINIA, A.–ROVERSIA, P. R.–BAZZOFFIB, P.–MOCALI, S. 2018: Effect of different set-aside management systems on soil nematode community and soil fertility in North, Central and South Italy – *Agriculture, Ecosystems & Environment*, Volume 261, 1 July 2018, pp. 251–260
- LAVALLEE, J. M.–SOONG, J. L.–COTRUFO, M. F. 2020: Conceptualizing soil organic matter into particulate and mineral-associated forms to address global change in the 21st century. *Global Change Biology*, 26(1), 261–273.
- LAWRENCE, R. C.–HARDEN, W. J.–XU, X.–SCHULZ, S. M.–TRUMBORE, E. S. 2015: Long-term controls on soil organic carbon with depth and time: A case study from the Cowlitz River Chronosequence, WA USA – *Geoderma* 247–248. pp. 73–87.
- LEHMANN, J. –SOLOMON, D. 2010: Organic Carbon Chemistry in Soils Observed by Synchrotron-based Spectroscopy. – *Developments in Soil Science* 34. pp. 289–312.
- LETTENS, S.–VAN ORSHOVEN, J.–VAN WESEMAEL, B.–MUSYS, B.–PERRIN, D. 2005: Soil organic carbon changes in landscape units of Belgium between 1960 and 2000 with reference to 1990 – *Global Change Biology* (2005) 11, pp. 2128–2140, doi: 10.1111/j.1365-2486.2005.01074.x
- LI, Y.–LI, Z.–CUI, S.–LIANG, G.–ZHANG, Q. 2021: Microbial-derived carbon components are critical for enhancing soil organic carbon in no-tillage croplands: A global perspective. – *Soil & Tillage Research* 205.

- LUGATO, E. – LAVALLEE, J. M. – HADDIX, M. L. – PANAGOS, P. – FRANCESCA COTRUFO, M. 2021: Different climate sensitivity of particulate and mineral-associated soil organic matter. *Nature Geoscience* 14. pp. 295–300.
- LUO, Z.–FENG, W.–LUO, Y.–BALDOCK, J.–WANG, E. 2017: Soil organic carbon dynamics jointly controlled by climate, carbon inputs, soil properties and soil carbon fractions. – *Global Change Biology* 23. pp. 4430–4439.
- MEHRA, P.–BAKER, J.–SOJKA, E. R.–BOLAN, N.–DESBIOLLES, J.–KIRKHAM, B. M.–ROSS, C.–GUPTA, R. 2018: Chapter Five - A Review of Tillage Practices and Their Potential to Impact the Soil Carbon Dynamics. – *Advances in Agronomy* 150. pp. 185–230.
- MENSAH, F.–SCHOENAU, J.J.–MALHI, S.S. 2003: Soil carbon changes in cultivated and excavated land converted to grasses in east-central Saskatchewan *Biogeochemistry* 63: pp. 85–92, 2003.
- NEMERGUT, R. D.–TOWNSEND, R. A.–SATTIN, R. S.–FREEMAN, R. K.–FIERER, N.–NEFF, C. J.–BOWMAN, D. W. –SCHADT, W. C.–WEINTRAUB, N. M.–SCHMIDT, K. S. 2008: The effects of chronic nitrogen fertilization on alpine tundra soil microbial communities: implications for carbon and nitrogen cycling. –*Environmental Microbiology* 10. pp. 3093–3105.
- OLORUNFEMI, I.–FASINMIRIN, J.–OJO, A. 2016: Modeling cation exchange capacity and soil water holding capacity from basic soil properties. – *Eurasian Journal of Soil Science* 5. (4) PP. 264–277.
- OECD (ORGANISATION FOR ECONOMIC CO-OPERATION AND DEVELOPMENT), 2015: Built-up area and built-up area change in countries and regions. Elérhetőség: https://stats.oecd.org/Index.aspx?DataSetCode=BUILT_UP Megtekintés dátuma: 2021. 03. 05.
- PETERSON, J. B.–MELILLO, M. J. 1985: The potential storage of carbon caused by eutrophication of the biosphere. – *Tellus* 37B, pp. 117–127.
- PONGE, J.-F. 2003: Humus forms in terrestrial ecosystems: a framework to biodiversity. – *Soil Biology and Biochemistry* 35. pp. 935–945.
- POEPLAU, C.–DON, A. 2013: Sensitivity of soil organic carbon stocks and fractions to different land-use changes across Europe – *Geoderma* 192 (2013) pp. 189–201.
- GUO Y. Q.–FANG X. – YOU C. F. – FEI T. 2011: Experimental studies on the effects of the “Conversion of Cropland to Grassland Program” on the water budget and evapotranspiration in a semi-arid steppe in Inner Mongolia, China – *Journal of Hydrology* 411. pp. 120–129.
- RESCK, D.V.S.–PEREIRA, J.–DA SILVA, J. E. 1991: Dinâmica da matéria orgânica na Região dos Cerrados. Documentos 36. – Embrapa Cerrados CPAC
- RITCHIE, H.–ROSER, M. 2013: Land use. – *Our world in Data* Elérhetőség: <https://ourworldindata.org/land-use> Megtekintés dátuma: 2021 03.01.
- ROWELL, D.L., 2014: *Soil science Methods & Applications*. – Routledge, New York.
- SANDERMAN, J. 2012: Can management induced changes in the carbonate system drive soil carbon sequestration? A review with particular focus on Australia. *Agricultural Ecosystem & Environment* 155. pp. 70–77. Cit in: MEHRA, P.–BAKER, J.–SOJKA, E. R.–BOLAN, N.–

- DESBIOLLES, J.–KIRKHAM, B. M.–ROSS, C.–GUPTA, R. 2018: Chapter Five - A Review of Tillage Practices and Their Potential to Impact the Soil Carbon Dynamics. – *Advances in Agronomy* 150. pp. 185–230.
- SHUKLA, R. P. –SKEA, J.–SLADE, R.–DIEMEN, R.–HAUGHEY, E.–MALLEY, J.–PATHAK, M.–PEREIRA, P. J. 2019: Technical Summary. – IPCC 2019: Climate change and land pp. 35-76.
- SMITH, P.–ANDRÉN, OLOF.–KARLSSON, T.–PERÄLÄ, P.–REGINA, K.–ROUNSEVELL, M.–VAN MESEVAEL, B. 2005: Carbon sequestration potential in European croplands has been overestimated – *Global Change Biology* 11. pp. 2153–2163.
- Smith, P.–Martino, D.–Cai, Z.–Gwary, D.–Janzen, H.–Kumar, P.–McCarl, B. – Ogle, S. – O'Mara, F. – Rice, C. – Scholes, B.–Sirotenko, O.–Howden, S.–McAllister, T.–Pan, G. – Romanenkov, V. – Schneider, U.–Towprayoon, S. – Wattenbach, M. – Smith, Jo. 2008: Greenhouse gas mitigation in agriculture. – *Philosophical transactions of the Royal Society of London. Series B, Biological sciences.* 363. pp. 789–813.
- STEFANOVITS P. 1975: Talajtan. – Mezőgazdasági Könyvkiadó, Budapest
- SWETHA, R. K.–Chakraborty, S. 2021: Combination of soil texture with Nix color sensor can improve soil organic carbon prediction. – *GEODERMA* 382.
- SZABÓ, G.–ZIMMERMANN, Z.–CSATHÓ, A. I.–SZENTES, SZ.–VIRÁGH, K.–BARTHA, S. 2014: A magyar földikutya [*Nannospalax (leucodon) hungaricus*] jelenlétének hatása a KMNP Tompapusztai löszgyep (Külső-gulya) finomléptékű szerkezetére – *Crisicum* 8: pp. 169–177. (2014).
- SZABÓ, L., VANCSEK, A., KIRÁLY, C., RINGER, M., KONDOR, A., JAKAB, G., SZALAI, Z., FILEP, T., 2020: Investigation of the sorption of 17 α -ethynylestradiol (EE2) on soils formed under aerobic and anaerobic conditions. – *Chemosphere* 240.
- TIROL, P.A.–RAI, M.–GATHALA, M.–SHARMA, S.–KUMAR, V.–SHARMA, P. C.–SHARMA, D.K.–WASSMANN, R.–LADHA, J. 2014: Assessing the performance of the photo-acoustic infrared gas monitor for measuring CO₂, N₂O, and CH₄ fluxes in two major cereal rotations. – *Global Change Biology* 20. (1) pp. 287–299. Cit in: MEHRA, P.–BAKER, J.–SOJKA, E. R.–BOLAN, N.–DESBIOLLES, J.–KIRKHAM, B. M.–ROSS, C.–GUPTA, R. 2018: Chapter Five - A Review of Tillage Practices and Their Potential to Impact the Soil Carbon Dynamics. – *Advances in Agronomy* 150. pp. 185–230.
- TORN, S. M.–TRUMBORE, E. S.–CHADWICK, A. O.–VITOUSEK, M.P.–HENDRICKS, M. D. 1997: Mineral control of soil organic carbon storage and turnover. – *Nature* 389.
- VEUM, K.S., GOYNE, K.W., KREMER, R.J., MILES, R.J., SUDDUTH, K.A. 2014: Biological indicators of soil quality and soil organic matter characteristics in an agricultural management continuum. *Biogeochemistry* 117. pp. 81–99.
- WANG, J.–FU, B.-J. – QIU, Y. – CHEN, L.-D. 2001: Soil nutrients in relation to land use and landscape position in the semi-arid small catchment on the loess plateau in China. – *Journal of Arid Environments.* 48. pp. 537–550.
- WANG, Y. –LI, Y. –YE, X.–CHU, Y. –WANG, X. 2010: Profile storage of organic/inorganic carbon in soil: From forest to desert. – *SCIENCE OF THE TOTAL ENVIRONMENT* 408. pp. 1925-1931.

- WEI, X.–SHAO, M.–FU, X.–HORTON, R.–LI, J.–ZHANG, X. 2009: Distribution of soil organic C, N and P in three adjacent land use patterns in the northern Loess Plateau, China – *Biogeochemistry* (2009) 96: pp. 149–162, DOI 10.1007/s 10533-009-9350-8
- WIESMEIER, M.–URBANSKI, L.–HOBLEY, E.–LANG, B.–LÜTZOW, M.–MARIN-SPIOTTAD, E.–WESEMAELE, B.–RABOT, E.–LIEß, M.–GARCIA-FRANCOA, N.–WOLLSCHLÄGERF, U.–VOGEL, H.-J.–KÖGEL-KNABNERA, I. 2019: Soil organic carbon storage as a key function of soils. – A review of drivers and indicators at various scales – *Geoderma* 333. pp. 149–162.
- WRIGHT, A. L.–HONS, F. M. 2005: Soil Carbon and Nitrogen Storage in Aggregates from Different Tillage and Crop Regimes – *Soil Science Society of America Journal* 69. pp. 141–147.
- YEASMIN, S., SINGH, B., SMERNIK, R.J., JOHNSTON, C.T. 2020: Effect of land use on organic matter composition in density fractions of contrasting soils: a comparative study using ¹³C NMR and DRIFT spectroscopy. – *Sci. Total Environ.* 726.
- ZANELLA, A. –PONGE, J-F.–JABIOL, B.–SARTORI, G.–KOLB, E.–BAYON, R-C.–GOBAT, J-M.–AUBERT, M.–WAAL, R. D.–DELFT, B.–VACCA, A.–SERRA, G.–CHERSICH, S.–ANDREETTA, A.–KÖLLI, R.–BRUN, J-J.–COOLS, N.–ENGLISH, M.–HAGER, H.–KATZENSTEINER, K.–BRÊTHES, A.–NICOLA, C.–TESTI, A.–BERNIER, N.–GRAEFE, U.–WOLF, U.–JUILLERET, J.–GARLATO, A.–OBBER, S.–GALVAN, P.–ZAMPEDRI, R.–FRIZZERA, L.–TOMASI, M.–BANAS, D.–BUREAU, F.–TATTI, D.–SALMON, S.–MENARDI, R.–FONTANELLA, F.–CARRARO, V.–PIZZEGHELLO, D.–CONCHERI, G.–SQUARTINI, A.–CATTANEO, D.–SCATTOLIN–NARDI, S.–NICOLINI, G.–VIOLA, F. 2018: Humusica 1, article 5: Terrestrial humus systems and forms - Keys of classification of humus systems and forms. – *Applied Soil Ecology* 122. pp. 75–86.
- ZHANG, Z.–LI, X.–JIANG, Z.–PENG, H.–LI, L.–ZHAO, G. 2013: Changes in some soil properties induced by re-conversion of cropland into grassland in the semiarid steppe zone of Inner Mongolia, China – *Plant Soil* 373, pp. 89–106 (2013) – <https://doi.org/10.1007/s11104-013-1772-3>
- ZHOU, X.–XU, X.–ZHOU, G.–LUO, Y. 2018: Temperature sensitivity of soil organic carbon decomposition increased with mean carbon residence time: field incubation and data assimilation. – *Global Change Biology* 24. pp. 810–822.