

szalai.zoltan_272_24

**Környezeti változások talajtakaróra
gyakorolt hatásainak geoökológiai
vizsgálata Magyarországon**

MTA doktori értekezés tézisei

Szalai Zoltán

Budapest.

2025.

Tézisfüzetben használt rövidítések jegyzéke

AAOM = aggregátumokban kötött szerves anyag

AAS= atomabszorpciós spektrométer

DRS = diffúz reflektancia spektroszkópia

Eh = Redoxpotenciál mV-ban meghatározott értéke

LMWOA = alacsony molekulatömegű szerves sav

MAOM = ásványi talajszemcsékhez kötött szerves anyag

pH = pondus hidrogenii – jelen

POM = szerves törmelék (friss holt szerves anyag)

SEM = pásztázó elektronmikroszkóp

SOM = talaj szerves anyag

TEM = transzmissziós elektronmikroszkóp

UV-ViS-NIR = ultraibolya-látható-infravörös tartományú fény

XRD = röntgen-pordiffráció

XRF = röntgenfluoreszcens spektrométer

Bevezetés

A tájkutatást, ezen belül a tájökológiát a földtudományok és az élettudományok is magukénak vallják. Míg a tájökológia leginkább a földfelszín mintázatainak elemzése, a tájökológiából kifejlődő geoökológia a mintázatban (tájmozaikban) lejátszódó folyamatok megértésére törekszik. Mivel a tájmozaikban megfigyelhető anyag és energiaáramok a globális folyamatok részei, ezért a geoökológia egyben a globális környezeti változások táji léptékű megértésének a tudománya (Leser és Löffler, 2017).

A Föld felszínének szárazulatai közel 149 millió km^2 -t tesznek ki, amiből hozzávetőleg 51 millió km^2 lakhatatlan, kb. 49 millió km^2 erdő és cserjés; 47 millió km^2 -en valamiféle mezőgazdasági tevékenység folyik (Hertel, 2011) és végezetül hozzávetőlegesen 4 millió km^2 beépített terület foglalnak el (Florczyk és mtsai., 2019; Ji és mtsai., 2020). Bolygónk ilyen mértékű elfoglalása szükségszerűen vezetett annak túlhasználatához. Ez a túlhasználat egyszerre jelenti a földfelszín területi szerkezetének megváltoztatását, valamint az egyébként is dinamikusan változó földi rendszerek közül a földfelszínen lejátszódó környezeti folyamatok (ún. exogén biogeokémiai körfolyamatok) megváltozását. Ezen változások összessége jelenti a *globális környezeti változások* összességét (Jacobson és mtsai., 2006).

Az általam elmúlt évtizedekben vezetett geoökológiai kutatások a fentiekben vázolt kérdéskörökhöz, azaz a biogeokémiai körfolyamatok, ezen belül is elsősorban a szénkörforgás (és kapcsolódó folyamatok) táji léptékű megváltozásához kapcsolódnak. A szén szerves formában történő stabilizálódása, ill. mineralizációja mindenképp szükségessé tette a talajtakaró ásványi összetevőinek vizsgálatát is. Jelen értekezés kilenc olyan tudományos közleményen alapul, melyek 2008 és 2024 között jelentek meg. Ezekben a tudományos közleményekben, ill. azok szintézisében a mezőgazdaság által átalakított tájmozaikokra összpontosítva az emberi hatások térbeli differenciálódására és a hatások időléptékére fókuszáltam:

Mivel az emberi hatások erőssége a különböző mezőgazdasági ágazatokban eltérőek, ezért kutatásaimban a mezőgazdasági ágazatok hatáserősségének két végpontjára fókuszáltam: a legintenzívebb tájhasználatot a szántóföldek által uralt tájmozaikok jelentik, míg összességében a legkevésbé jelentős emberi hatásokkal a kaszálórétek által uralt tájmozaikokban számolhatunk. A domborzati hatást mindkét ágazat esetében vizsgáltam: a szántókon és a kaszálóréteken egyaránt egy-egy dombvidéki és síkvidéki mintaterületen végeztem kutatásaim (részletes bemutatásuk a 3.1 fejezetben).

A tájmozaikok struktúráját kétféle megközelítésben is meghatároztam. A kutatás jellegétől függően a tájökológiai térszemlélet alapját jelentő tájfoltok (Forman, 1995), ill. a geoökológiai értelemben legkisebb homogén térbeli egységet jelentő ökotópok (Fortescue, 1980) egyaránt az általam definiált tájmozaikok alapjául szolgáltak. Az előbbi esetben a legkisebb homogén egységeket egyszerűen légi/űrfelvételekről azonosítható növényzeti mintázatok, az utóbbi esetben a legkisebb homogén térbeli egységek alapja a terepi (monitorozó) mérések és laborvizsgálatok mérési eredményei voltak.

Amint arról a fentiekben említést tettem, Magyarország agrártájaiban a szántóföldek jelentik a nagyobb mértékű emberi hatásokat. (A legjelentősebb hatást a termelődő biomassa és tápelemek legintenzívebb elszállítását = laterális elemáramok, továbbá a fizikai és kémiai talajkörnyezet legjelentősebb megváltoztatását jelenti.) A mezőgazdaság által átalakított területek közül a szántóföldek jelentős részaránnyal képviseltetik magukat, így azok globális szinten is hatnak a környezeti rendszerekre: összesített területük a világszinten kb. 10 millió km² (a 47 millió km² mezőgazdasági területből), míg Magyarországon a szántók 41 ezer km² -t foglalnak el az összesen 51 ezer km² mezőgazdasági területhasználatból ("KSH – Mezőgazdaság").

Mivel hatékony szántóföldi gazdálkodás olyan talajokon lehetséges, ahol az ásványi fázis átalakulási sebessége emberi létékben lassú (kivétel az eróziós folyamatok által kiváltott változások), ezért ezeken a területeken végzett kutatásaim elsősorban a talaj szerves fáziséval kapcsolatos változásokra fókuszáltak. Ezekkel kapcsolatban az alábbi terület-specifikus kérdések fogalmazódtak meg:

1. ***Egy szántóföldön belül is értelmezhető keretrendszer-e a tájmozaik?*** A szántóföldeken belül lehetséges-e kisebb homogén térrészek lehatárolása? A szántóföldeket hajlamosak vagyunk homogén területi egységként kezelni, pedig azok távolról sem azok. Geoökológusi / tájkutatói szemmel az első felmerülő kérdés a legkisebb homogén térbeli egységek lehatárolásának módja, ill. a szántóföldeken melyek a legkisebb homogén térbeli egységek?
2. ***A szántóföldek kialakításakor (erdő – szántóföld területhasználat váltás) milyen gyorsan kezdődik meg a talaj szerves anyag átalakulása?*** Ennek a kérdésnek tisztázására egy olyan inkubációs modellkísérletet végeztünk, amiben egy korábban mezőgazdasági művelés által nem érintett (erdő) talajhoz adagoltunk kukoricából származó szerves törmeléket (POM-ot). A kísérletben arra voltam kíváncsi, hogy a szántóföldi haszonnövényből származó szerves anyag közel fél év alatt

hatással van-e a talaj szerves anyagára, vagy ez a hatás csak hosszabb időléptékben valósulhat-e meg?

3. ***Egy síkvidéki szántóföldön vizuálisan lehatárolható (és évtizedes időtávlatban fenntartott) növényzeti mintázatokban megtörténik-e a talaj szerves összetevőinek területi differenciálódása?*** Más szóval a Forman (1995) által definiált (elméleti) elemi tájfolt évtizedes időtávban differenciálja-e a talaj szerves összetevőit? Ezt a kutatási kérdést a HUN-REN ATK 1960-as években indított tartamkísérletére alapoztam, amelyben immáron hatvanéves időtávban tartanak fenn légi és űrfelvételekről azonosítható, Forman (1995) által megfogalmazott definíciónak megfelelő tájfoltokból felépülő egyfajta mesterséges tájmozaik.
4. ***A relieffel rendelkező dombsági szántón az eróziós/szedimentációs folyamatok mely talajtulajdonságok térbeli mintázatait alakítják ki?*** Az erózió talaj szerves anyag átrendező (erodált részeken csökkenti, az akkumulációs térszíneken növeli) szerepe trivialitás. Ezen folyamatok talaj szerves anyag minőségi paraméterekre gyakorolt hatása azonban nem triviális. A Ceglédbercel-Aranyhegy dombsági szántóföldi mintaterületen (5/B. ábra) az alábbi részkérdésekre kerestünk választ: 1./ Az SOM minőségi paramétereiben is kialakul-e az SOM mennyiségi paramétereirehöz hasonlatos területi mozaikosság? 2./ A területi változatosság kialakulásához a talajszemcsék mozgása, vagy valamely egyéb folyamat vezet-e? 3./ A szedimentációra visszavezethetően kialakulhat-e egyfajta felszín alatti mozaikosság?

A mezőgazdasági területhasználat a szántóföldnél kisebb intenzitású ágazatai a kaszálórétek, ill. legelők. Más agrárágazatok által használt területekhez hasonlatosan a gyepeket is érinti a biológiai produkció (takarmány, ill. élőállat formájában történő) és azáltal a talajból származó tápelemek (pl. N, P, K, stb...) elszállítása. Ennek a folyamatnak a mértékéről, ill. a talaj szerves szénkészletre gyakorolt hatásáról csak nagyon kevés és szórványos információ áll rendelkezésre. Az üde és vízhatású gyepek nemcsak a globális élelmiszertermelés, hanem a nagy földi rendszerek (szénkörforgás, vízkörforgás stb....) működése szempontból is jelentős szerepet töltenek be. A lápokot leszámítva a sztyepeken és a vizes élőhelyeken kialakult gyepek talajaiban tárolódik a Föld talajaiban kötött szerves szén legjelentősebb része (Köchy és mtsai., 2015; Quinones, 2023). Ezek területek a közvetlen éghajlatszabályzó funkción túl a globális és helyi vízkörforgásban (talajok víznyelő képessége által), továbbá a helyi időjárási események befolyásolásában (Tímár és mtsai., 2024) is szerepet játszanak.

A legelőként és kaszálóként hasznosított területek a FAO összesítése szerint a földfelszín teljes felületének a 26%-át teszi ki, ami egyben a világ mezőgazdasági területeinek mintegy 68%-ának felel meg. Az élelmiszertermelésbe bevont gyepek egy jelentős része egyben vizes élőhely (wetland) is. Világszinten a vizes élőhelyek a földfelszín mintegy bő 10%-át fedik le, aminek az egy harmada kaszálórétként (ill. legelőként) funkcionál. Magyarországon a kaszálók és legelők jelentősége a világátlagénál csekélyebb. A KSH adatai ("KSH - Mezőgazdaság") szerint a mezőgazdasági területek által lefedett kb. 5 millió hektárnak mindössze 15%-a tartozik ide. Magyarországon a vizes élőhelyek közé tartozó kaszálók és legelők arányáról nincs statisztikai adat. A kaszálók és legelőket tartalmazó tájablakok sokkal változatosabbak annál, mint ami egy felületes szemlélő számára szembeötlő. A mozaikosságot a domborzat (és a vízhatás mértéke) és az emberi hatások változó intenzitásának metszete jelöl ki. Egy ilyen tájablakban az összetettebb táji rendszernek köszönhetően jóval több kérdés fogalmazható meg. A rövid időtávú folyamatokkal kapcsolatosan az alábbi kérdésekre fókuszáltam:

1. ***A szemmel látható (ill. térképről / légifotóról / űrfelvételről) lehatárolható tájfoltok¹ (vagy ökotópokat) mennyiben jelentenek térben definiálható egységet a gyorsan változó környezeti paraméterek (pl. pH, Eh)² számára?*** Ez a kérdés a területi aspektusokon túl az akár órák időtartamában lejátszódó eseményeket is vizsgálja. A redoxviszonyok mintázatainak megismerésének jelentősége az, hogy a szén, a nitrogén, a vas és más elemek biogeokémiai körfolyamatainak pontosabb képet kaphatunk.
2. ***Egy adott tájmozaikon belül mely tájalkotó tényezők határozzák a gyorsan változó környezeti paraméterek mintázatait?*** Egy nem bolygatott talajban a közvélekedés szerint elsősorban a vízhatás mértéke befolyásolja elsősorban a redoxkörnyezetet, de ez valójában nem triviális.
3. ***A kaszálóréteken és legelőkön mely jellemző emberi tevékenységek hatnak rövid távon a gyorsan változó paraméterekre?*** Ez a kérdés a fenti kérdéshez kapcsolódik, hiszen egy területen a biogeokémiai körfolyamatokat befolyásoló paraméterek minden látható jel nélkül képesek jelentősen megváltozni.

¹ Ez a kérdés valójában Carl Troll 1939-ben tett felvetéséhez, azaz a tájökológia legelső momentumához nyúlik vissza, hiszen Troll épp légifelvételek interpretációja alapján definiálta a tájmozaikot és határozta le a legkisebb homogén (táji szinten értelmezett) területi egységeket.

² Ezek párhuzamosíthatók Rhode (1947) által megfogalmazott ún. rövid távú talajképző folyamatokkal (shorter-term soil functioning processes -SFPs) (Lin, 2011)

A tájmozaikokat alkotó ökotópokban a talajok általában „*altípus*”, olykor „*talajtípus*” szinten is különböznek egymástól, ami geoökológiai szempontból a talajok osztályozásának alapjául szolgáló tulajdonságok mozaikosságát jelenti. Ezek a talajtulajdonságok egyik legfontosabb motorja talaj vízforgalmának jellegzetessége, ami a vizsgált területeken a vízhatás erősségét jelenti. Ezek a talajtulajdonságok a vízforgalmi típus, ill. a hidromorf területeken a vízhatás erősségének függvényében évszázados, illetve évezredes időléptékben ható folyamatok eredményei:

4. ***A szemmel látható (ill. térképről/légifotóról/űrfelvételről) lehatárolható tájfoltokat (illetve a mérésekkel definiálható ökotópokat) mennyiben követik a talajok mintázatai (pedotópok)?***
Amennyiben a tájfoltok/ökotópok mintázatai nem követik a tájmozaikot, a területen vélelmezhetően olyan környezeti változások zajlanak, melyek talajfejlődési folyamatok irányát is megváltoztatták, de ezen folyamatok a limitált időtartam miatt még nem alakíthatták ki az adott ökotópra jellemző talajtulajdonságokat.³
5. ***A hidromorf körülmények miatt felgyorsult talajképződés kizárólagos oka-e a vízhatás, ill. annak erőssége?*** Közkeletű vélekedés szerint a vízhatás a talaj szerves anyagok felhalmozódását és a pedogén mállás sebességét egyaránt gyorsítja. Ez a talajtudományban bevett, de mégis leegyszerűsített modell finomításra szorul, mivel az edényes növények talajkémiai paraméterek jelentős mértékű befolyásolására képesek. Mivel a növényzeti mintázatok a tájfoltok és az ökotópok lehatárolásában is kiemelt fontosságúak, ezért kérdésként merülhet fel a növényzeti mintázatok talajképződés sebességét befolyásoló szerepe. A növényzeti mintázatokra nemcsak szerves anyag forrás mintázatokra, hanem az ásványi összetevőkre ható pedogén folyamatgyűttesek térbeli differenciáló tényezőjeként tekinthetünk.
6. ***A hidromorf körülmények miatt felgyorsult talajképződés milyen időtávlatban történik meg?*** A talajtanban tudományos konszenzus van a talajfejlődés főbb stádiumai és azok időléptéke tekintetében (Lin, 2011, Jeny, 1961). A talaj szerves anyagok felhalmozódása már a juvenilis állapotú talajokban bekövetkezi, de a szilárd fázis ásványi összetevőinek (a mállás és talajalkotók elmozdulása általi) megváltozása ezeréves (10^3), ill. akár tízezer éves (10^4) időtávlatokban értelmezhető. A szakirodalomban szinté egyetértés van afelől, hogy a málláshoz és

³ A talaj szerves és ásványi fázisainak tulajdonságai voltaképp Nestrujev (1926) által elsőként megfogalmazott hosszútávú specifikus talajképző folyamatoknak (specific pedogenic processes - SPP) feleltethetők meg (Lin, 2011).

transzlokációhoz hidromorf körülmények esetén csupán néhány száz év is elegendő.

A környezeti változásokkal kapcsolatban végzett geoökológiai kutatások nem mehetnek el napjaink egyre égetőbbé váló kérdése, a kémiai környezet megváltozása mellett! A környezetbe kerülő vegyi anyagok (növényvédőszer, gyógyszerhatóanyag, antibiotikumok, stb...) a mezőgazdasági tájban is jelen vannak. Jóllehet ezen anyagok környezeti koncentrációja alacsony (ezért is hívják ezeket az anyagokat szerves mikroszennyezőknek), de környezeti hatásuk jelentős. A táji rendszerekben ezen anyagok egyik fő forrása a kommunális szennyvíz, továbbá a növényvédelem és az állatgyógyászat. A humán és állatgyógyászatban alkalmazott vegyületek az öntözővizekben és a trágyázásra is használt szennyvíziszapban is jelen vannak. A szerves mikroszennyezők a szénkörforgás résztvevőiként (egy ideig) szintén a talajokban tartózkodnak. A szerves mikroszennyezők megkötődésének erőssége, azok tartózkodási ideje, valamint az általuk okozott környezeti kockázatok a tájmozaik különböző ökotópjaiban vélelmezhetően mások és mások. Ezeknek a folyamatoknak a térbeli és időbeli vetületeivel kapcsolatban az ismereteink azonban erősen limitáltak. Ezzel a témakörrel kapcsolatban az öntözés, nagyüzemi állatgyógyászat és szennyvíztisztítás által egyaránt érintett a szántó – kaszáló rendszert egységben vizsgálva kerestem válaszokat:

1. ***A különböző ökotópokban/tájfoltokban a talaj ásványi és szerves összetevőinek térbeli különbözőségei befolyásolják-e a gyógyszerhatóanyagok által okozott környezeti kockázatokat?*** Ez a kérdés valójában két kérdésre keres választ: A./ Mekkora veszélye annak, hogy ezek az anyagok a gyökértkörnyezetben maradványként a humán táplálékláncba kerültek? B./ Mekkora az esélye annak, hogy ezek az anyagok a mélybeszivárgó vízzel együtt az ivóvízbázisok felé tudnak elmozdulni?
2. ***Milyen időléptékben következhetnek be olyan változások, amelyek hatására a talajokban megkötődött gyógyszerhatóanyagok ismét felszabadulhatnak?*** Ennek a kérdésnek a teljes mélységben történő megválaszolása túlmutat ezen értekezés keretein, de jól kapcsolódik a szántókon és a kaszálóréteken vizsgált gyorsan változó paraméterekhez.

Az általam végzett geoökológiai kutatások során egyfajta tisztán elméleti, az ember által kiváltott környezeti változásokat nem érintő geoökológiai kérdés megválaszolására is lehetőséget biztosítottak:

1. ***Vertikálisan mekkora egy tájfolt kiterjedése?*** Az ökotópok esetében a kérdést ugyan nem szokták megválaszolni, de van rá értelmezhető válasz.

A $\approx$ *koordinátatengely* (+) irányában leginkább ott lehet a határ, ahol a mikroklima hatása megszűnik. A tájfeltölteket az ökotópokkal ellentétben leginkább csak 2D képződményeknek tekintik, de Forman (1995) tájfeltöltekekkel kapcsolatos megállapításai ezt az általános vélekedés cáfolja. A kérdés az általam vezetett kutatások esetében a z koordinátatengely (-) irányában merül fel. A talajtakaróban milyen mélységig terjed ki a tájfeltöltés/ökotóp?

A fentiekben vázolt geoökológiai kutatások különböző terepi és laboratóriumi méréseken alapultak. Alkalmazott módszerek egy része a földrajzi és talajtani kutatások gyakorlatában bevettnek számítanak, de voltak közöttük speciálisabb vizsgálatok is. Kutatásaim során felmerültek olyan módszertani kihívások is, amelyeket saját módszerfejlesztéssel kellett leküzdeni.

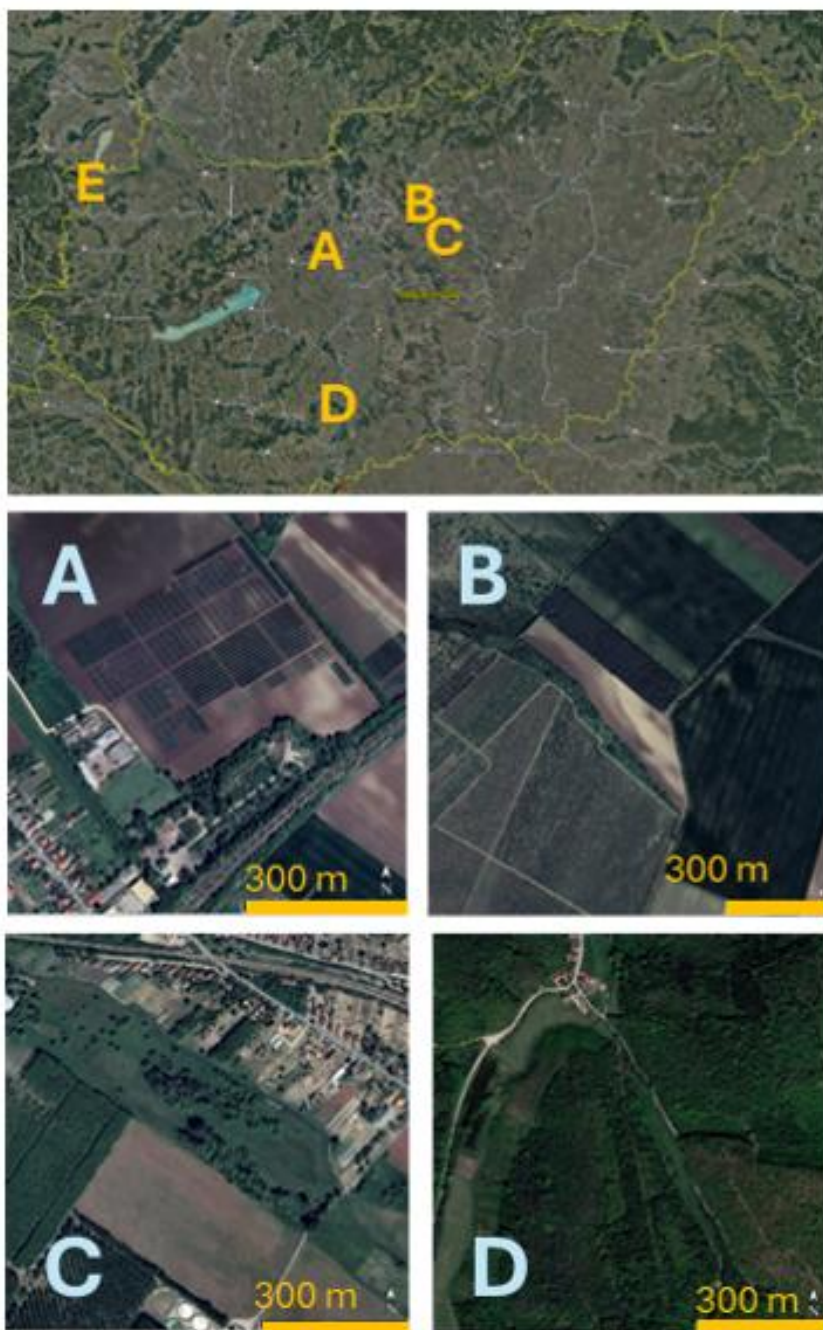
Az alkalmazott módszerek rövid összefoglalása

Mintaterületek

A kutatások összesen öt magyarországi területet érintettek (1. ábra). Az erdőszántó területhasználat-váltást modellező kísérletünkhöz a talajokat a Soproni-hegységben gyűjtöttük. A szántóföldi kutatások részben a HUN-REN ATK Martonvásár tartamkísérletén, részben Ceglédbercel-Aranyhegy egy 3,2 ha területű kompakt kisvízgyűjtőn elhelyezkedő, intenzíven művelt szántóföldön folytak. A kaszálórétekkel kapcsolatos kutatásokat szintén egy-egy síkvidéki és dombvidéki tájablak mozaikjában végeztük. A síkvidéki szántó – kaszálórét – láp mozaikban végzett kutatásom területe egy kb. 8 hektáros tájmozaikra összpontosított. A dombvidéki kaszálóréteken végzett kutatások a Tolna-megyei Völgyességben, a Bátaapáti-patak egyik nevenincs, É-D-i csapásirányú mellékvölgyében folytak.

Tájfeltöltekek lehatárolása

A tájfeltöltekek lehatárolását Forman (1995) és Leser (1976) elveinek kombinálásával végeztük el. Ceglédbercel Aranyhegy mintaterületén a tájmozaik alapját a különböző területhasználati egységek jelentették. A szántóföldön belül a homogén területi egységeket a domborzat a talaj fizikai és kémiai különbözőségei határozták meg. Martonvásár mintaterületén a homogén területi egységeket a növényzet által kirajzolt parcellák jelentették. Bátaapáti és Ceglédbercel Mocsárréteken a domborzat, a vízhatás és a növényzet (területhasználat) metszete rajzolta ki a legkisebb homogénnek tekintett területi egységeket.



1. ábra. Az értekezés forrásaiként szolgáló kutatások mintaterületei. A.) HUN-REN ATK Martonvásár Tartamkísérlet, B.) Ceglédbercel - Aranyhegy, C.) Ceglédbercel-Mocsárrét, D.) Bátapáti, E.) Modellkísérlethez felhasznált talaj: Soproni hegység, Deák-kút (Google Earth alapján)

Mintavétel, terepi mérések, laboratóriumi vizsgálatok

A mintaterületek topográfiáját geodéziai módszerekkel határoztuk meg. A talajok leírását (ott ahol erre lehetőség adódott) talajszelvények alapján írtam le, ahol erre nem volt lehetőség Edelman-féle talajfúrót, ill. Pürkhauer-féle szűrőbotot használtam. A terepi mérések és megfigyelések döntően gyorseszteken alapultak. A terepi monitorozó mérésekre a réti és láptalajok vizsgálata esetében került sor. Ezeken a területeken az Eh, a pH és a talajhőmérséklet (T) méréseket végeztem. A redoxviszonyokat vas oxidációs állapotának viszonyában a mért Eh és pH eredményekből számított összefüggések alapján számítottam (1. táblázat.).

1. táblázat. Redox állapotváltozás számított Eh értéke. A számítások 1 mmol vizes oldatban levő Fe^{2+} aktivitására vonatkozóan (25°C-on. E_0 = standard potenciál) alapulnak (Szalai és mtsai., 2021).

Redox párok	E_0 (V)	Eh számítása	Forrás
$\text{Fe}(\text{OH})_3\text{-Fe}_3(\text{OH})_8$	0.429	$Eh=0.429-0.059\text{pH}$	Ponnamperuma és mtsai., 1967
$\text{Fe}_3(\text{OH})_8\text{-Fe}(\text{OH})_2$	0.195	$Eh=0.195-0.059\text{pH}$	Ponnamperuma és mtsai., 1967
Ferrihidrit-Sziderit	0.181	$Eh=0.181-0.059\text{pH}$	Meek és Chesworth 2008
$\text{Fe}(\text{OH})_3\text{-Fe}(\text{OH})_2$	0.273	$Eh=0.273-0.059\text{pH}$	(Lemos és mtsai., 2007)

A kutatások során a laboratóriumi eljárások széles tárházából válogathattam kezdve az általánosan bevett talajlaboratóriumi mérésektől kezdve, a speciális mintaelőkészítéseken (pl. szelektív kioldások) alapuló vizsgálatokon át, egészen a speciális nagyműszeres vizsgálatokig (pl. lézerdiffrakció, DRS spektroszkópia, fl-AAS, wd-XRF. XRD, SEM, TEM, stb....). A talaj szerves anyagát klasszikus alkalikus kivonási eljárásokkal kivont Huminsav és Fulvosav preparátumokból (IHSS), ill. Zimmermann és munkatársai (2007) által kifejlesztett módszerrel frakcionált szerves frakciók (DOM, POM, AAOM, MAOM) alapján vizsgáltuk.

(DOM = vízoldható szerves anyag; POM = szerves törmelék,

A szilárd halmazállapotú SOM frakciók tulajdonságainak jellemzésére elemvizsgáló mérésekből származtatott C/N, H/C és O/C arányokat használtunk. Az SOM kémiai tulajdonságai meghatározására szintén sokféle analitikai eljárás állt rendelkezésemre (DRS spektroszkópia, DRIFT spektroszkópia, IRMS, radiokarbon vizsgálatok, stb...).

Adatfeldolgozás

A mérésekből származó adatokat geostatistikai módszerekkel elemeztem ki. Ezek között az első lépés mindig a normalitásvizsgálat volt. A talajtulajdonságok és a környezeti változók közötti kapcsolatok felderítésére (a sokaság eloszlásától

függően) paraméteres, vagy nem paraméteres tesztekkel használtam. A bonyolultabb kapcsolatok feltárására legáltalánosabban a főkomponens analízis módszerét használtam. A vizsgált elemek csoportosítását hierarchikus osztályozással, ill. ún. post-hoc tesztekkel végeztem.

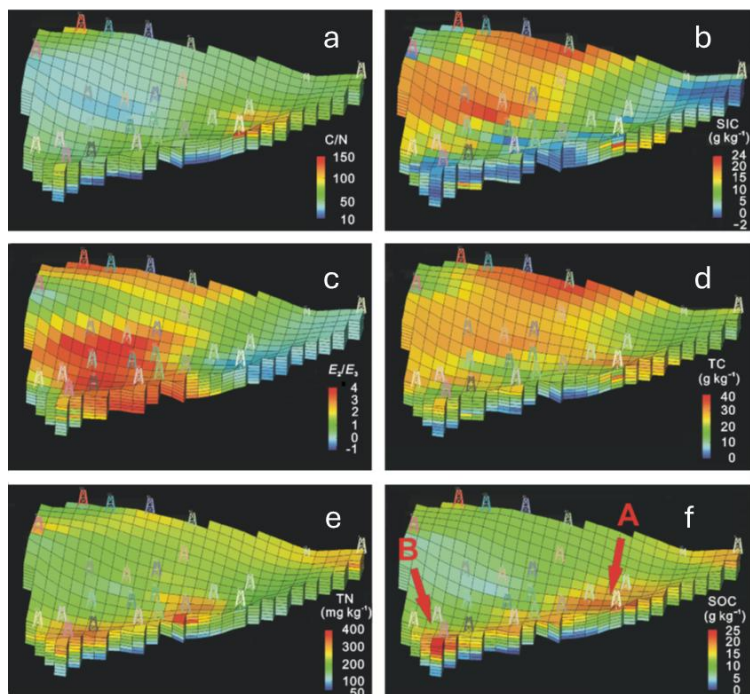
Tézisek

1. tézis. Szántóföldeken belül lehatárolható területi egységek kialakulása a szilárd és folyadékfázisokhoz kötött szelektív elmozdulására vezethető vissza. A szántóföldeken belül tájökölógiai értelemben vett tájfeltok általában nem határolhatóak le, de geoökölógiai értelemben vett ökotópok azonosíthatók.

A geoökölógiai értelemben meghatározható területi egységek az SOM szelektív elmozdulása által alakulnak ki. Ezek a mintázatok nemcsak a felszínen, de a felszín alatt is azonosíthatók. A differenciálódás nemcsak az SOM mennyiségében, de minőségi paramétereiben is megjelenik. Az SOM térben kialakuló minőségi differenciálódásának a motorja a területhasználatváltás és az évszázadokon keresztül folyamatosan fenntartott talajművelés. A talajerózió eredményeként elmozduló szerves anyag által megtett távolság a szállítódás módjától függ. A lehordódási területhez közel kialakuló helyi erózióbázison elsősorban a stabilabb, vízstabil aggregátumokban szállítódó SOM halmozódik fel. A labilis formában mozgó SOM viszont a nagyobb távolságokban kialakuló helyi erózióbázisokig is eljut (2. ábra). (A fent megfogalmazott tézist alapjaiban nem befolyásolja, de legújabb kutatási eredményeink alapján a stabil és a vízdoldható SOM frakciók eredete eltérő. A labilis vízdoldható frakció nagyobb részt a friss szerves anyagokból (POM) származnak, míg a kötött formák stabilabb, és egyúttal idősebb szemet tartalmazó szerves anyagból eredeztethetők.)

2. tézis. Az ökotópok vertikális kiterjedése a talajtakaró irányában is értelmezhető. Az ökotópok a szolum alsó határáig terjednek ki.

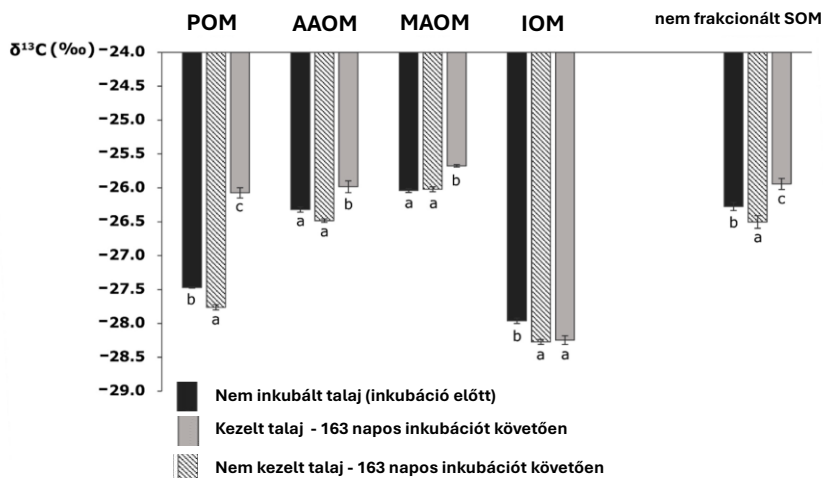
A tájfeltok vertikális kiterjedése a talajtakaró mélységének irányában is értelmezhető. A laboratóriumban vizsgálható talajtulajdonságok és a terepen hosszútávú redox mérések eredményei egyaránt a szolum aljáig mutatnak horizontálisan értelmezhető mintázatot. Ezek szerint az ökotópok alapján definiált tájmozaikok vertikális kiterjedését a talajtakaró irányában a szolum mélysége határozza meg. Amennyiben tájmozaik ökotópjait nem 2D, hanem 3D egységként akarjuk definiálni, akkor az alsó felszín a szolum, a felsőt pedig a mikroklíma határozza meg.



2. ábra. A vizsgált paraméterek térbeli eloszlásának modellje Ceglédbercel Aranyhegy mintaterületen (1/B ábra). TC = összes szén, SIC = talaj szerves szén, SOC = talaj szerves szén, TN = összes kötött nitrogén, E₂/E₃ vízdoldható frakció 250 és 365nm-en mért abszorbanancia értékeinek hányadosa.

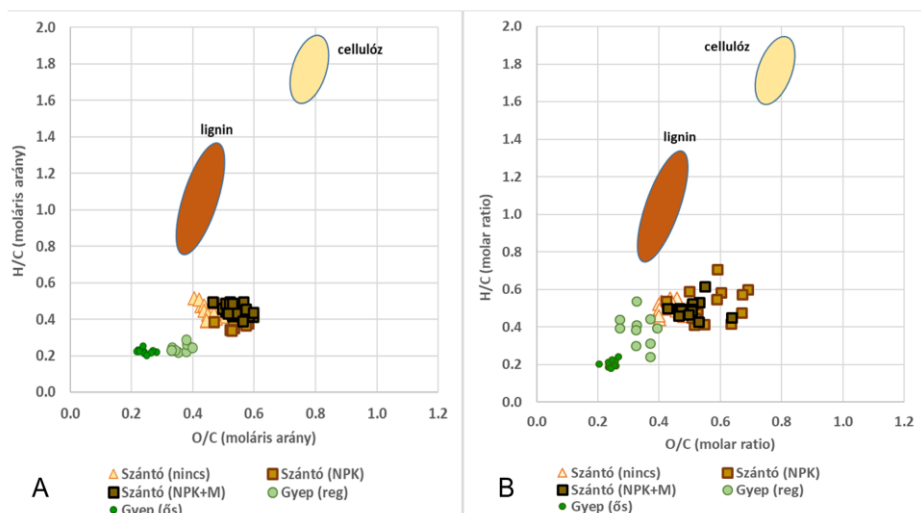
3. tézis. *Területhasználat váltás esetén annak hatása már kb. fél év alatt (163 napon belül) megjelenhet a talaj szerves anyag kémiai tulajdonságaiban. A talaj szerves anyag kémiai tulajdonságaiban a változások már azelőtt megkezdődnek, mielőtt annak mennyisége megváltozna. A talaj szerves anyag kémiai tulajdonságainak megváltozása hosszabb (évtizedes) időléptékben is szelektív. Egyes tulajdonságok még ebben az időtávban is változatlanok maradnak.*

A stabil szénizotópos (¹³C) vizsgálatok, az infravörös spektroszkópiái (DRIFT) mérésekből származtatott paraméterek és a C/N arány alapján egy modellkísérletben a területhasználat váltás eredményeként megváltozó szerves anyag forrás elsőként a rendszer bemenetét jelentő POM frakcióban jelenik, de az új szerves anyag forrásból származó szerves szén fél év elteltével már a tíz évet meghaladó MRT-vel rendelkező MAOM és AAOM frakciókban is kimutatható (3. ábra).



3. ábra. A frakcionálatlan SOM és az SOM frakciók $\delta^{13}\text{C}$ értékei.

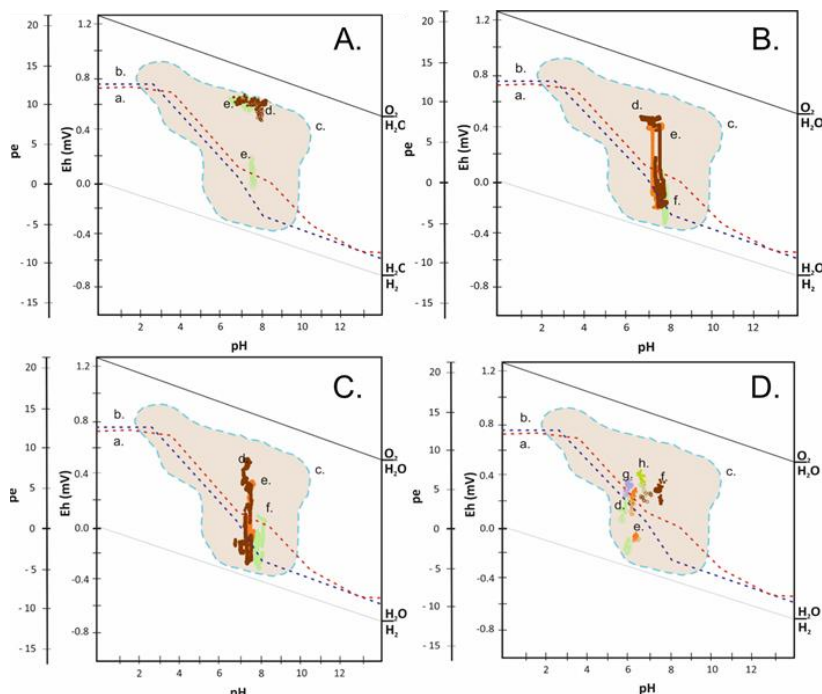
Az ökotóp regenerálódásakor a változások üteme szintén a labilis SOM frakciókban gyorsabb, de a különböző SOM tulajdonságok megváltozásának sebessége is különböző. A szántó-gyep területhasználat változáskor elsőként az SOM hidrogéntartalma (H/C arány) csökken le (az aromás komponensek dúsulása okán), míg az SOM O/C aránya 20 év elteltével is a szántóföldihez hasonló marad (4. ábra).



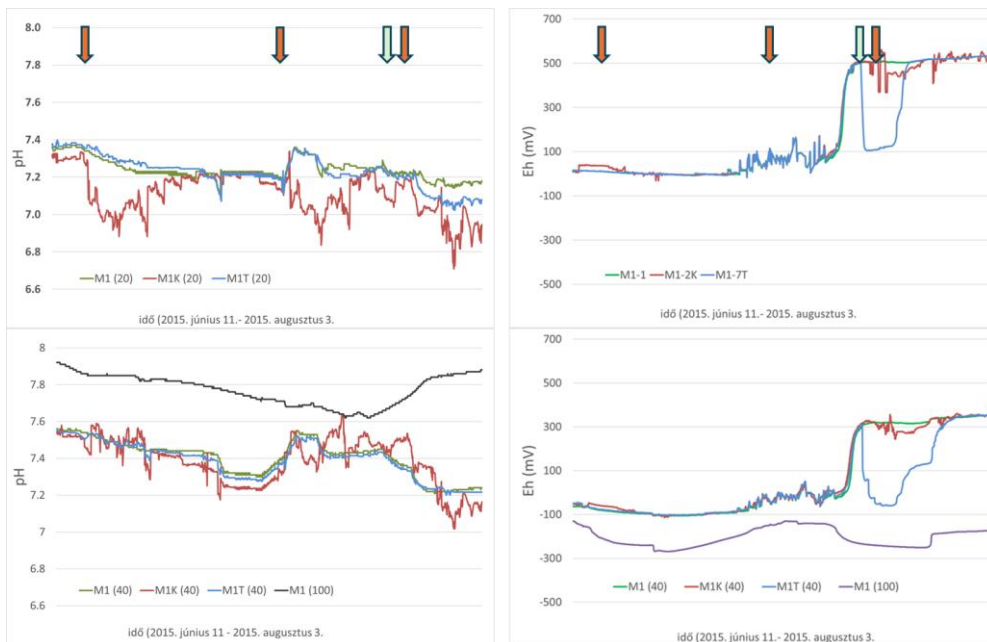
4. ábra. Mészlepedékes csernozjom Ap ill. Ah szintjeiből gyűjtött talaj szerves anyag H/C és O/C arányai vanKrevelen diagrammba illesztve követően történt. A = AAOM frakció; B = MAOM frakció; ● = ligninre jellemző terület, ○ = cellulózra jellemző terület

4. tézis. *Mocsárréteken belül nem a vízhatás erőssége, hanem az edényes növények mintázatai határozzák meg a talajtakaró redoxviszonyait. A mocsárrétek kaszálása és legeltetése (taposás) szintén az edényes növények által változtatja meg a talajtakaró kémiai tulajdonságait.*

Az általános vélekedés szerint egy terület talajában a redukzív viszonyok erőssége a víztelítettség mértéke és időbeli hosszának függvényében alakul. Vizsgálataim szerint mocsári környezetben (hidromorf talajképződés jellemző, de a vízhatás korlátozottabb, ezért ásványi talajok alakulnak ki) az oxidációs-redukciós viszonyok nem a vízhatás erősségének függvényében, hanem a növényzeti mintázatokhoz igazodva alakul ki (5. ábra). Az ilyen területek fenntartásában a kaszálás, ill. legeltetés alapvető folyamat. E tevékenységek a talajok redoxviszonyaira is hatással vannak. A kaszálás a talajban mérhető pH-ra, a taposás pedig az Eh-ra hat. Mindkét tevékenység hatásainak időtartama hetekben mérhető (6. ábra).



5. ábra. Tájfoltok talajainak redox viszonyai. Mindegyik alábbi ábrában *a* = vas fázisváltás $\text{FeOH}_3 - \text{Fe}_3(\text{OH})_8$, *b* = vas fázisváltás ferrihidrit és sziderit között, *c* = talajokra jellemző redoxviszonyok; **A./** Ceglédbercel tájblak *e* = TS22 (xerofil gye) 20 cm (teli kör) és 60 cm (üres kör), *f* = TS27 (üde gye) pontokban 20 cm (teli kör) és 40 cm (üres kör); **B./** Ceglédbercel kaszált rókasásos (M1): *d* = 20 cm, *e* = 40 cm, *f* = 100 cm; **C./** Ceglédbercel nem kaszált parti sásos (M2): *d* = 20 cm, *e* = 40 cm, *f* = 100 cm; **D./** Bábaapáti talajok 20 cm-en: *d* = nem kaszált parti sásos (CRX2), *e* = kaszált parti sásos (CRX1), *f* = kaszált rókasásos (CRX0), *g* = mezei zsurlós (EQU), *h* = csalános (URT)



6. ábra. A 2015. június 11. és 2015. augusztus 3. között kivitelezett kaszálós és taposós kísérlet pH (bal oldalon) és Eh (jobb oldalon) adatai 10 perces felbontásban. Kísérlet helye Ceglédbercel Mocsárrét M1 pont környezete. Az M1 mögötti számok az érzékelő cm-ben megadott mélységét jelzik.; K = kaszált terület; T = taposott terület; a kék keretes piros nyílak a kaszálás időpontját jelzik, a kék keretes zöld nyíl a taposás időpontját jelzi.

5. tézis. *Hidromorf ökotópokat is magukba foglaló tájmozaikok lecsapolódását (lecsapolását) követően a domborzat és a talajtulajdonságok nem egyértelműen irányító tájalkotó tényezői a területhasználat-szerkezet megváltozásának.*

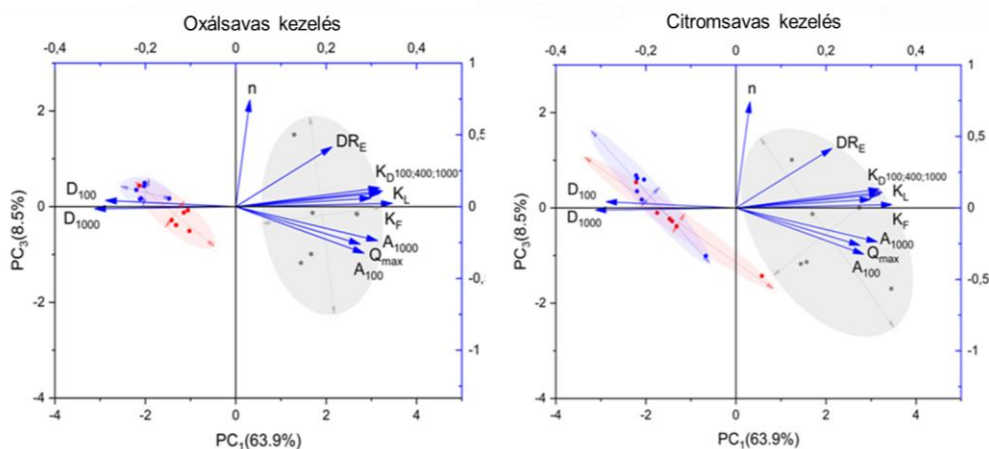
Egy terület lecsapolását követően a legmélyebb helyzetű és egyúttal a legmagasabb SOM tartalmú talajokkal jellemezhető területeken várható leghosszabb ideig az eredeti lápi környezet fennmaradása. Az általam vizsgált területeken a lápok nedves kaszálórétté alakulása ezzel ellentétben esetleges volt. Azaz ebben az esetben a tájhasználat területi szerkezetének átalakulásánál a természeti tájalkotó tényezők hatása elhanyagolható.

6. tézis. *Egy tájmozaik különböző ökotópjainak talajaiban a talaj szerves anyag mennyisége, a talaj szerves anyag minősége, valamint a növényzet fenofázisa egyaránt meghatározza a szerves mikroszennyezők megkötődésének és mobilizálódásának mértékét. A környezetbe kerülő szerves mikroszennyezők által okozott környezeti kockázat ökotóponként eltér, de ezek a különbségek évszakosan változnak.*

A különböző ökotópokra jellemző eltérő talajkörnyezet a talaj szerves és ásványi fázisait egyaránt területileg különbözővé teszi. Az emberi tevékenységek során a környezetbe kerülő szerves mikroszennyezők (ezen belül is a gyógyszerhatóanyagok) a magasabb SOM-tartalmú talajokban erősebben kötődnek meg és megkötődésük intenzitása a pH-tól alapvetően független. Az alacsonyabb SOM tartalmú talajok feltalajában ezen anyagok megkötődése is korlátozottabb.

Az altalajban a savasan vagy lúgosan disszociálódó gyógyszerhatóanyagok megkötődése (disszociált állapotban) alapvetően az agyagásványok felületén történik. A pH megváltozásával ezen anyagok könnyen ismét oldott fázisba kerülhetnek. A diagenetikus (detritális) ásványokban gazdag talajsztégekben (talajokban) a szerves mikroszennyezők nem, ill. csak kevésbé kötődnek meg.

A vegetációs időszakban a növények által a gyökérkörnyezetbe jutott LMOWA-k a gyógyszerhatóanyagok mindegyikének megkötődését fokozzák, de egyúttal az ezek által megkötött szerves anyagok deszorbeálódnak is. Ebből kifolyólag a gyógyszerhatóanyagok talajokban történő megkötődését nemcsak a talajtulajdonságok, de (az edényes növényzet által) az idő is befolyásolja.

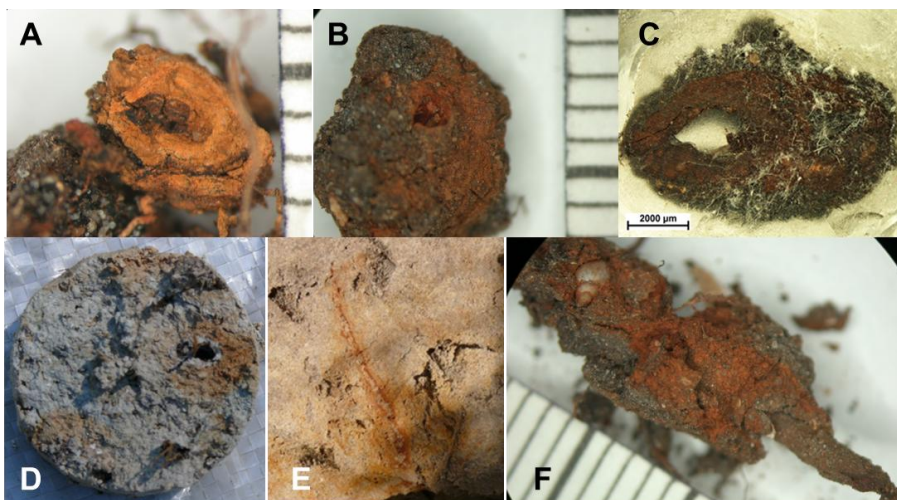


8. ábra. A gyógyszerhatóanyagok szorpciós paramétereinek főkomponens-elemzése.

7. tézis. *A hidromorf talajok ásványi fázisának fejlődését (pedogén mállás) elsősorban nem a permanens vízhatás, hanem az ingadozó (fluktuáló) redoxviszonyok okozzák.*

A talajfejlődés leglassabb aspektusa az ásványi fázis fejlődése, ezen belül is a „kvázi oldhatatlan” ásványok (talajtani értelemben a CaCO_3 -nál nehezebben oldható

ásványok) átalakulása, ill. mállásuk során felszabaduló elemek elmozdulása a talajszelvény mentén. A redoxviszonyok intenzív ingadozása (6. ábra) ezeket a pedogén mállási folyamatokat a tartós vízhatásnál is sokkal jelentősebb mértékben (évszázados vs. évtizedes) gyorsítja fel. Fél évszázados időléptékben nemcsak szabad vasásványok (7. ábra), hanem pedogén agyagásványok helyben történő pedogén kialakulása is igazolható. Geoökológiai megközelítésben a felgyorsult talajfejlődés az edényes növények redox környezet alakító szerepének köszönhető, így kijelenthető, hogy a felgyorsult talajképződés meghatározott ökotíphoz rendelhető.



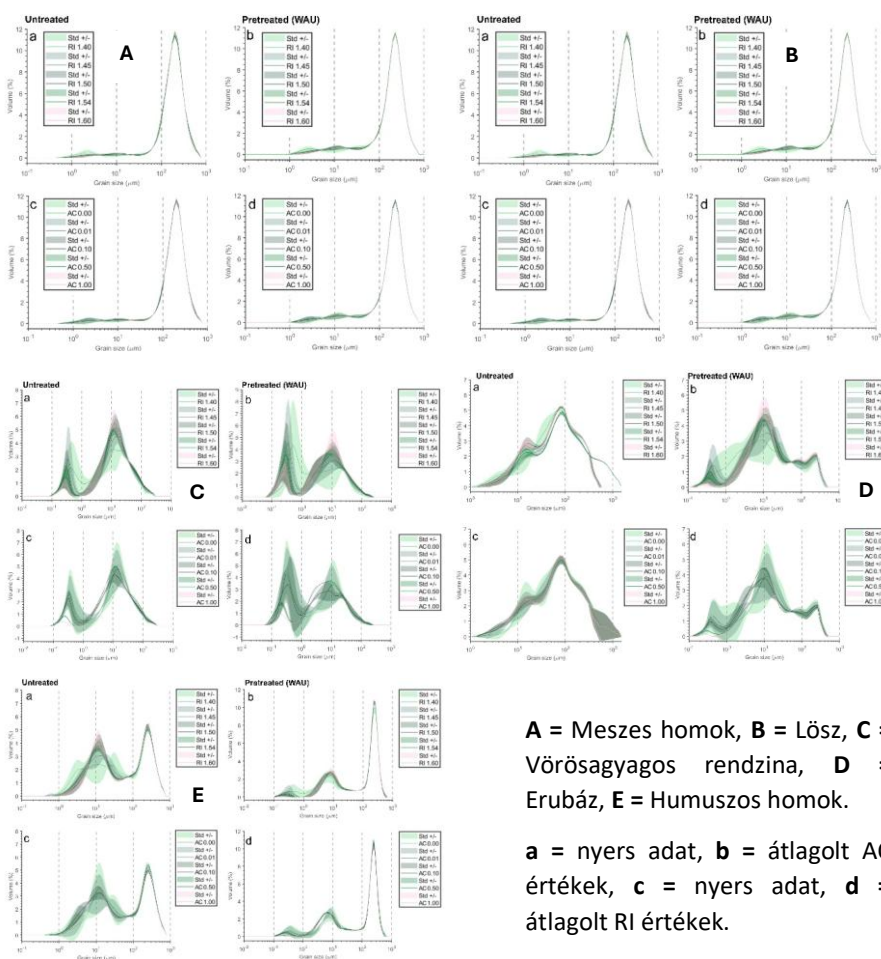
7. ábra. Vaskiválások a gyökerek körül. **A-C, F./** Lápós réti talajok 0-10 cm-es H szintjeiben a zömmel háromértékű vasat tartalmazó ásványok a gyökerek körül csapódnak ki. Ebben a környezetben a pH és az Eh értékek egyszerre csökkennek; **D./** M2 100 cm-en a parti sás gyökeréből származó exudátumok redukáló hatása redukatív zóna alakul ki. A rhizoplántól távolodva az aerenchimákból származó oxigén feloxidálja a kétértékű vasat; **E./** A gyökérsavak a humuszos homokban is gyorsítják a mállás folyamatát. (A, B, C, F képek szerzője Ringer Marianna)

8. tézis. Az *UV-ViS-NIR* diffúz reflektancia spektroszkópiai (DRS) mérések kiegészítő eljárásként felhasználhatóak a talaj vasásványok azonosítására.

Ez a mérési technika rutinszerűen goetheit (910-920 nm) és hematit (890-900 nm) kimutatására. Ugyanez az eljárás az XRD-vel nem kimutató kétértékű vasat tartalmazó Fougerit csoportba tartozó ásványok kimutatására (475 nm és 555 nm) is használható. A szerves anyagok zavaró hatásának kiküszöbölésére a spektrumok értelmezése előtt Kubelka-Munk transzformációt kell használni.

9. tézis. A talajok szöveti sajátosságainak meghatározásához alkalmazott lézerdiffrakciós mérések esetében sem univerzális mintaelőkészítési módszerek, sem általánosan használható törésmutató értékek nem határozhatók meg.

A lézerdiffrakció alapú szemcseméret eloszlás méréshez egységes kémiai előkészítési eljárás és optikai beállítás még akkor sem határozható meg, ha a talaj ásványi fázisának jelentős részét a kvarc, ill. ahhoz nagyon hasonló törésmutatójú ásványok alkotják. A magas homoktartalmú minták sem az optikai paraméterek beállítására, sem a kémiai előkezelésre nem érzékenyek. A szövet finomodásával törésmutató jelentősége nő. A törésmutató értékének növekedésével a törésmutató hatása az eloszlásgörbére viszont csökken, és ezzel együtt az abszorpciós koeficiens (AC) hatása nő (9. ábra).



9. ábra. A kezeletlen és kezelt minták átlagolt törésmutatói (RI) és abszorpciós koeficiensei (AC) és mérések kémiai előkezelések hatása az üledékek és talajok szemcseeloszlására.

**Az értekezés alapjául szolgáló tudományos közlemények
(időrendi sorrendben)**

- Szalai, Z.** Spatial and temporal pattern of soil pH and Eh and their impact on solute iron content in a wetland (Transdanubia, Hungary) ACTA GEOGRAPHICA DEBRECINA LANDSCAPE AND ENVIRONMENT SERIES 2 : 1 pp. 34-45. , 12 p. (2008)
- Szalai, Z;** Kiss, K ; Jakab, G ; Sipos, P ; Belucz, B ; Németh, T. The use of UV-VIS-NIR reflectance spectroscopy to identify iron minerals ASTRONOMISCHE NACHRICHTEN 334 : 9 pp. 940-943. , 4 p. (2013)
- Szalai, Z ;** Szabó, J ; Kovács, J ; Mészáros, E ; Albert, G ; Centeri, Cs ; Szabó, B ; Madarász, B ; Zacháry, D ; Jakab, G. Redistribution of soil organic carbon triggered by erosion at field scale under subhumid climate, Hungary PEDOSPHERE 26 : 5 pp. 652-665. , 14 p. (2016)
- Jakab, G ; Hegyi, I ; Fullen, M ; Szabó, J ; Zacháry, D ; **Szalai, Z.** A 300-year record of sedimentation in a small tilled catena in Hungary based on $\delta^{13}\text{C}$, $\delta^{15}\text{N}$, and C/N distribution JOURNAL OF SOILS AND SEDIMENTS 18 : 4 pp. 1767-1779. , 13 p. (2018)
- Zacháry, D ; Filep, T ; Jakab, G ; Molnár, M ; Kertész, T ; Király, Cs ; Hegyi, I ; Gáspár, L ; **Szalai, Z *** Carbon isotope measurements to determine the turnover of soil organic matter fractions in a temperate forest soil AGRONOMY (BASEL) 10 : 12 Paper: 1944 , 13 p. (2020)
- Szalai, Z ;** Ringer, M ; Németh, T ; Sipos, P ; Perényi, K ; Pekker, P ; Balázs, R ; Vancsik, A V ; Zacháry, D ; Szabó, L ; Filep T; Varga Gy; Jakab G. Accelerated soil development due to seasonal water-saturation under hydric conditions. GEODERMA 401 Paper: 115328 , 14 p. (2021)
- Al-Graiti, T ; Jakab, G ; Ujházy, N ; Vancsik, A ; Fodor, N ; Árendás, T ; Madarász, B ; Barcza, Z ; Márialigeti, K ; **Szalai, Z.** The composition of dissolved organic matter in arable lands: does soil management practice matter? AGRONOMY (BASEL) 12 : 11 Paper: 2797 , 13 p. (2022)
- Szabó, L ; Vancsik, A ; Bauer, L ; Jakab, G ; Király, Cs ; Hatvani, IG ; Kondor, A Cs ; **Szalai, Z.** Effects of root-derived organic acids on sorption of pharmaceutically active compounds in sandy topsoil CHEMOSPHERE 355 Paper: 141759 , 11 p. (2024)
- Gresina, F ; **Szalai Z*** ; Zacháry D; Kiss K; Madarász B; Angyal Zs; Jakab G; Darabos G; Varga Gy. Combined effect of pretreatments and optical settings on the laser diffraction particle size distribution of soils and sediments. JOURNAL OF SOILS AND SEDIMENTS 25 pp. 160-178. , 19 p. (2025)

**Az értekezésben fel nem használt, de annak témáihoz
kapcsolódó kiemelt szerzős közlemények
(időrendi sorrendben)**

- Szalai, Z** ; Németh, T. Elemi táji mintázatok hatása talajkémiai paraméterekre FÖLDRAJZI ÉRTESÍTŐ (1952-2008) 57 : 1-2 pp. 135-146. , 12 p. (2008)
- Szalai, Z** ; Jakab, G ; Németh, T ; Sipos, P ; Mészáros, E ; di, Gleria M ; Madarász, B ; Varga, I ; Horváth, Szabó K. Dynamics of organic carbon and dissolved iron in relation to landscape diversity HUNGARIAN GEOGRAPHICAL BULLETIN (2009-) 59 : 1 pp. 17-33. , 17 p. (2010)
- Szalai, Z** ; Kiss, K ; Horváth-Szabó, K ; Jakab, G ; Németh, T ; Sipos, P ; Fehér, K ; Szabó, M ; Mészáros, E ; Madarász, B. A vas oldékonyságának évszakos és napszakos dinamikája típusos réti talajban és tőzezes láptalajban TALAJVÉDELEM 2011 : különszám pp. 167-175. , 9 p. (2011)
- Szalai, Z** ; Szabó, M ; Zboray, N ; Kiss, K ; Horváth-Szabó, K ; Jakab, G ; Balázs, R ; Németh, T ; Madarász, B. Relationship between ecological indicators and soil properties (in case of a wetland) HUNGARIAN GEOGRAPHICAL BULLETIN (2009-) 61 : 3 pp. 187-196. , 10 p. (2012)
- Horváth-Szabó, K ; **Szalai, Z** ; Balázs, R ; Kiss, K ; Jakab, G ; Fehér, K ; Németh, T ; Mészáros, E ; Sipos, P ; Madarász, B. A vas és a mangán oldhatóságának vizsgálata réti és láptalajban TALAJVÉDELEM 2013 : különszám pp. 261-272. , 12 p. (2013)
- Udvardi, B ; Kovacs, I J ; Fancsik, T ; Konya, P ; Batori, M ; Stercel, F ; Falus, G ; **Szalai, Z**. Effects of particle size on the attenuated total reflection spectrum of minerals. APPLIED SPECTROSCOPY 71 : 6 pp. 1157-1168. , 12 p. (2017)
- Zacháry, D ; Filep, T ; Jakab, G ; Varga, G ; Ringer, M ; **Szalai, Z**. Kinetic parameters of soil organic matter decomposition in soils under forest in Hungary GEODERMA REGIONAL 14 Paper: UNSP e00187 , 10 p. (2018)
- Jakab, G ; **Szalai, Z*** ; Michalkó, G ; Ringer, M ; Filep, T ; Szabó, L ; Maász, G ; Pirger, Zs ; Ferincz, Á ; Staszny, Á ; Dobosy P ; Kondor A. Thermal baths as sources of pharmaceutical and illicit drug contamination ENVIRONMENTAL SCIENCE AND POLLUTION RESEARCH 27 : 1 pp. 399-410. , 12 p. (2020)
- Ringer, M ; Jakab, G ; Sipos, P ; Szabó, M ; Horváth-Szabó, K ; Perényi, K ; **Szalai, Z** Vertical differentiation of pedogenic iron forms – a key of hydromorphic soil profile development HUNGARIAN GEOGRAPHICAL BULLETIN (2009-) 70 : 4 pp. 369-380. , 12 p. (2021)
- Kondor, A Cs ; Molnár, É ; Jakab, G ; Vancsik, A ; Filep, T ; Szeberényi, J ; Szabó, L ; Maász, G ; Pirger, Zs ; Weiperth, A ; Ferincz Aá ; Staszny Á ; Dobosy P ; Horváthné Kiss K ; Hatvani I.G ; **Szalai Z**. Pharmaceuticals in water and sediment of small streams

under the pressure of urbanization: Concentrations, interactions, and risks
SCIENCE OF THE TOTAL ENVIRONMENT 808 Paper: 152160 , 11 p. (2022)

Zacháry, D ; Filep, T ; Jakab, G ; Ringer, M ; Balázs, R ; Németh, T ; **Szalai, Z.** The effect of mineral composition on soil organic matter turnover in temperate forest soils
JOURNAL OF SOILS AND SEDIMENTS 23 : 3 pp. 1389-1402. , 14 p. (2023)

Zacháry, D ; Filep, T ; Jakab, G ; Ringer, M ; Balázs, R ; Németh, T ; **Szalai, Z.** Texture and clay mineralogy as main drivers of the priming effect in temperate forest soils
PLANT AND SOIL , 19 p. (2024)

Vancsik, A ; Szabó, L ; Bauer, L ; Pirger, Zs ; Karlik, M ; Kondor, A Cs ; Jakab, G ; **Szalai, Z.** Impact of land use-induced soil heterogeneity on the adsorption of fluoroquinolone antibiotics, tested on organic matter pools
JOURNAL OF HAZARDOUS MATERIALS 474 Paper: 134704 , 12 p. (2024)

Filep, T ; Zacháry, D ; Balláné, Kovács A ; Király, Cs ; Béni, Á ; Jakab, G ; Juhász, E K ; **Szalai, Z** Insight into the dynamics of protected and non-protected carbon pools in four soils with different land uses
PLANT AND SOIL (2024)