

Doktori (Ph.D.) értekezés

**Soproni Egyetem**

Roth Gyula Erdészeti és Vadgazdálkodási Tudományok Doktori Iskola

Erdei ökoszisztémák ökológiája és diverzitása (E1) Program

***Kocsánytalan tölgy és fehér akác állományok befolyása a talaj aggregátumdinamikájára és szervesanyag-megkötésére***

*Készítette:*

Mátra Zoltán Soma

*Témavezetők:*

Dr. habil. Heil Bálint

Dr. habil. Kovács Gábor

Sopron

2022



*Kocsánytalan tölgy és fehér akác állományok befolyása a talaj aggregátumdinamikájára és szervesanyag-megkötésére*

Értekezés doktori (PhD) fokozat elnyerése érdekében

Írta:

**Mátra Zoltán Soma**

Készült a Soproni Egyetem

Roth Gyula Erdészeti és Vadgazdálkodási Tudományok Doktori Iskola  
Erdei ökoszisztémák ökológiája és diverzitása (E1) programja keretében

Témavezetők: Dr. habil. Heil Bálint egyetemi docens

Elfogadásra javaslom (igen / nem)

.....  
(aláírás)

Dr. habil. Kovács Gábor egyetemi docens

Elfogadásra javaslom (igen / nem)

.....  
(aláírás)

A jelölt a doktori szigorlaton .....%-ot ért el.

Sopron, .....

.....  
a Szigorlati Bizottság elnöke

Az értekezést bírálóként elfogadásra javaslom (igen / nem):

Első bíráló, Dr. .... (igen / nem)

.....  
(aláírás)

Második bíráló, Dr. .... (igen / nem)

.....  
(aláírás)

(Esetleg harmadik bíráló, Dr. .... (igen / nem))

.....  
(aláírás)

A jelölt az értekezés nyilvános vitáján .....%-ot ért el.

Sopron, .....

.....  
a Bírálóbizottság elnöke

A doktori (PhD) oklevél minősítése: .....

.....  
Az EDHT elnöke



## NYILATKOZAT

Alulírott **Mátra Zoltán Soma**, jelen nyilatkozat aláírásával kijelentem, hogy a **„Kocsánytalan tölgy és fehér akác állományok befolyása a talaj aggregátumdinamikájára és szervesanyag-megkötésére”** című PhD értekezésem önálló munkám, az értekezés készítése során betartottam a szerzői jogról szóló 1999. évi LXXVI. törvény szabályait, valamint a **Roth Gyula Erdészeti és Vadgazdálkodási Tudományok Doktori Iskola** által előírt, a doktori értekezés készítésére vonatkozó szabályokat, különösen a hivatkozások és idézések tekintetében.<sup>1</sup>

Kijelentem továbbá, hogy az értekezés készítése során az önálló kutatómunka kitétel tekintetében témavezetőmet, illetve a programvezetőt nem tévesztettem meg.

Jelen nyilatkozat aláírásával tudomásul veszem, hogy amennyiben bizonyítható, hogy az értekezést nem magam készítettem, vagy az értekezéssel kapcsolatban szerzői jogsértés ténye merül fel, a Soproni Egyetem megtagadja az értekezés befogadását.

Az értekezés befogadásának megtagadása nem érinti a szerzői jogsértés miatti egyéb (polgári jogi, szabálysértési jogi, büntetőjogi) jogkövetkezményeket.

Sopron, 20.....

.....  
doktorjelölt

---

<sup>1</sup> 1999. évi LXXVI. tv. **34. § (1) A mű részletét – az átvevő mű jellege és célja által indokolt terjedelemben és az eredetihez híven – a forrás, valamint az ott megjelölt szerző megnevezésével bárki idézheti.**

36. § (1) Nyilvánosan tartott előadások és más hasonló művek részletei, valamint politikai beszédek tájékoztatás céljára – a cél által indokolt terjedelemben – szabadon felhasználhatók. Ilyen felhasználás esetén a forrást – a szerző nevével együtt – fel kell tüntetni, hacsak ez lehetetlennek nem bizonyul.



## Tartalomjegyzék

Kivonat.....	4
Abstract.....	4
Nomenklatúra és fogalommagyarázat.....	5
1. Bevezetés.....	7
2. Célkitűzés, hipotézisek.....	9
3. Szakirodalmi áttekintés.....	10
3.1. Az érintett fafajok rövid bemutatása.....	10
3.1.1. Fehér akác.....	10
3.1.2. Kocsánytalan tölgy.....	11
3.2. Hamis idősor.....	11
3.3. A talaj, mint polidiszperz rendszer és vizsgálata.....	12
3.3.1. A talaj elemi összetevői (fizikai féleség).....	12
3.3.2. A talaj szerves anyagai.....	12
3.3.3. Szervesanyag-tárolás (szénmegkötés) a talajban.....	13
3.3.5. Aggregátumok definiálása.....	14
3.3.6. Az aggregátumok szerepe és jelentősége.....	15
3.3.7. Az aggregátumok keletkezése és kötőanyagaik.....	16
3.3.8. Az aggregátumok és pórusok hierarchiája.....	17
3.3.9. Az aggregátumok tartóssága.....	18
3.4. A négy legfontosabb vizsgálati eljárás rövid áttekintése.....	18
3.4.1. Textúra-meghatározás.....	18
3.4.2. Sűrűségkülönbség-alapú SOM-frakcionálás.....	20
3.4.3. Optikai elvű szemcsevizsgálatok.....	21

3.4.4. Aggregátumstabilitás-vizsgálatok.....	24
4. Anyag és módszer.....	25
4.1. A kísérlet felépítése.....	25
4.2. Talajminta-vételezés és minta-előkészítés.....	25
4.3. Laboratóriumi vizsgálatok.....	27
4.3.1. C, N referenciamérések, pH-meghatározás.....	27
4.3.2. Textúra-meghatározás.....	27
4.3.3. Sűrűségkülönbség-alapú SOM-frakcionálás.....	29
4.3.4. Digitális dinamikus képanalízis.....	30
4.3.5. Statisztikai értékelés.....	32
5. Eredmények és következtetések.....	35
5.1. Általános termőhelyi paraméterek.....	35
5.2. Készletadatok.....	36
5.3. Szervetlen széntartalom.....	39
5.4. A kémhatás.....	39
5.5. A textúra.....	41
5.6. A talaj szervesanyag-raktárai.....	45
5.7. A referencia- és a SOM-frakciónkon belüli C/N arányok.....	55
5.8. Az aggregátumméret alakulása.....	58
5.9. Az aggregátumstabilitás alakulása.....	64
5.10. A szfericitás.....	72
6. Diskusszió.....	80
6.1. Hamis idősor.....	80
6.2. A talaj szerves szénkészlete.....	80



6.3. Tartamos szervesanyag-megkötés a talajban.....	81
6.4. Az aggregátumok.....	82
6.5. Hipotézisvizsgálat.....	84
6.6. Kitekintés.....	84
7. Új tudományos eredmények (tézisek).....	86
8. Összefoglalás.....	88
9. Köszönetnyilvánítás.....	90
10. Irodalomjegyzék.....	91
11. Függelék.....	107

## **Kivonat**

Cím: *Kocsánytalan tölgy és fehér akác állományok befolyása a talaj aggregátumdinamikájára és szervesanyag-megkötésére.*

Ahhoz, hogy a talajban a szervesanyag-raktározás, illetve az aggregátumképződés dinamikáját tanulmányozhassuk, majd ezeket valamely talajtípusra vonatkozóan becsülni tudjuk, egy soktényezős rendszer működését kell vizsgálnunk, majd leírunk (modelleznünk). Cambisolokon, fátlan és fás vegetációk termőhelyeit egybevetve utóbbiakra összetettebb szerkezeti struktúra mutatkozott; aggregátumméret alapján a fátlan területek < akácos termőhelyek < tölgy termőhelyek sorrend adódott. Aggregátumstabilitásra az ismert fordított arányosság: növekvő mérettel csökkenő stabilitás igazolódott. A szervesanyag-megkötés folyamata a talajban különböző utakon zajlik, a fafajok befolyása változatos. Fátlan területekhez viszonyítva az akác a szabad könnyű frakció gyarapodását gátolta, de pozitív hatással volt a kötött könnyű frakcióra. A tölgy pozitív befolyását igazoltuk a kötött könnyű, és a nehéz frakció vonatkozásában is.

## **Abstract**

Title: *Effects of sessile oak and black locust forests on soil-aggregate dynamics and SOM sequestration.*

In order to examine the dynamics of soil organic matter (SOM) sequestration and the formation of soil aggregates – furthermore, to be able to make estimates on those based on soil type – a multi-factorial system has to be analyzed and described (modeled). When comparing treeless and forested Cambisol sites, the latter has manifested more complex aggregates. According to aggregate size the ascending order was treeless sites < black locust sites < oak sites. The known inverse ratio correlation, that increasing size results in decreasing stability was proven. The process of SOM sequestration follows various pathways, whereas the impact of tree species differs. Compared to treeless sites, black locust inhibited the formation of free light fraction but had a positive impact on the occluded light fraction. A positive impact of oak was proven both in the light as well as in the heavy fractions.

## Nomenklatúra és fogalommagyarázat

célváltozók	Valamely parametrikus regresszióanalízis függő változója vagy kimeneti változói, amelyeket a prediktor(okkal) becslünk
$D_r$	Rate of Disruption: aggregátum-szételési ráta, az aggregátumstabilitás kifejezésére
Feret-átmérő	Szemcsék méretmeghatározásánál két párhuzamos érintőtengely távolsága, véletlen elhelyezkedésű leképezés mellett
$Feret_{min}$	Kellően sok irányból mérve a részecskénél mért legkisebb Feret-átmérő
fLF	free Light Fraction: szabad, minerális szemcsékhez nem kötött könnyű szemcsés szervesfrakció a talajban; egyes források f-POM-ként emlegetik
HF	Heavy Fraction: minerális szemcsék felületéhez nagy erővel kötött amorf szervesfrakció; egyes források MOM-ként (mineral-associated organic matter) emlegetik
kvantilisek	Statisztikai helyzetmutatók: a rangsorba rendezett sokaságot valamely ismérvérték (statisztikai változó) szerint részekre osztják; leggyakoribb jelöléseik: „Q” vagy „q” jelen munkában átmérőre vonatkozóan: „D <sub>x</sub> ”
kvintilisek	A rangsorba rendezett sokaságot öt részre osztó statisztikai helyzetmutatók (5-öd rendű kvantilisek) elnevezése
(lineáris) prediktor	Parametrikus regresszióanalíziseknél regressziós koeficiensek és független változók (magyarázó változók, bemeneti paraméterek) sorainak lineáris kombinációja
LMM-ek	Linear mixed effects models: lineáris kevert-hatás modellek; tudományos kutatáshoz köthető komplex, hierarchikus felépítésű adathalmazok analíziséhez használatos „segédeszközök”
LMM rögzített effektusok	Fixed effects: LMM-ek alkalmazásánál a kutatásban tanulmányozni kívánt (releváns) prediktortok csoportja
LMM véletlen effektusok	Random effects: LMM-ek alkalmazása esetén a becslést potenciálisan befolyásoló véletlen faktorok; tipikusan a csoportok közötti variancia („csoportosító faktorok”) amelyeket igyekszünk kiiktatni, mert tudjuk róluk, hogy befolyással bírhatnak a kimentő változóra
modell/ modellezés	Jelenségek matematikai (hipotézis-rendszereken keresztül) megfogalmazása azzal a céllal, hogy a modellezni kívánt rendszer valamely paramétereit előrejelezhessük, illetve egy összetett rendszert jobban megértsünk
OC	Organic Carbon: szerves szén
oLF	occluded Light Fraction: minerális szemcsékbe (aggregátumokba) zárt könnyű szemcsés szervesfrakció; egyes források o-POM-ként emlegetik
POM	Particulate Organic Matter: (elhalt) szerves szemcsék/törmelékek
SOC	Soil Organic Carbon: szerves szénkészlet a talajban
SOM	Soil Organic Matter: a talaj szervesanyag-tartalma
$\rho$	Sűrűség [ $g \cdot cm^{-3}$ ]
S	Szfericitás: egy térbeli objektum gömbszerűsége; viszonyszám: 0–1 között
VMD	Volume Mean Diameter: szemcse-térfogattal súlyozott átlagos szemcseátmérő



## 1. Bevezetés

A talajok „hidat”, kapcsolódási pontokat képeznek a hidroszféra, litoszféra, atmoszféra és bioszféra között. Kulcsszerepük sokoldalúságukban áll: környezeti rendszerek összetett szabályozói, ugyanakkor maguk is változnak, illetve változatos anyagok raktározói és pufferei. Napjainkban aktív, rövidebb-hosszabb időléptékű szén-, (illetve szerves anyag) raktár-funkciójuk kiemelt figyelmet kap (Jastrow & Miller, 1996; Batjes, 1996; Hassink, 1997; Hedges et al., 2000; Swift, 2001; Kaiser et al., 2002; Lal, 2005; Sarkhot et al., 2007; Pan et al., 2011; Smith et al., 2015; Fekete et al., 2017; Fekete et al., 2021; Lavalée et al., 2020; Juhos et al., 2021). A sok funkciót ellátni képes, jól működő ökoszisztémák, illetve a termékeny, vagyis tápanyagokkal, nedvességgel jól ellátott termőhelyek morfológiailag változatos, összetett szerkezetet teteleznek fel (Peng et al., 2015). A talajszerkezet egyszerűbb és bonyolult formájú szilárd talajösszetevők, valamint a köztes terek (pórusok) képezte komplex mátrix (Meurer et al., 2020), amely mátrix összetevői változatos tényezők (talajképző tényezők, szűkebb értelemben aggregátumképző tényezők) hatására aggregátumokká rendeződnek. Amelung és mtsai. (2018) leírják, hogy a szerkezet fennmaradásának egyik feltétele a rendszeres szervesanyag-utánpótlás, amely legfőbb forrása erdőtalajok esetében az avar.

A szervesanyag-felhalmozódás a talajban különböző formában és időléptékben érhető tetten. Feltalajokban túlnyomórészt elhalt növényi maradványokkal találkozhatunk, (valamelyik típusú) humusz formájában, amely minősége és mennyisége valamennyi ökoszisztémában meghatározó; többek között kiváló nedvességraktározási tulajdonsága miatt (Amelung et al., 2018). Ezzel szemben altalajokban különösen stabil humuszkötések, organo-minerális egységek kialakulása figyelhető meg. Mind a talajban megtalálható szerves anyagok (SOM), mind az aggregátumok termőhelyspecifikus sajátosságokat mutatnak; ebből következik az ökoszisztémában betöltött összetett funkciójuk is. Tanulmányok igazolják növényi életközösségek különböző talajparaméterekre, illetve a makro- és mikroaggregátum-képződésre gyakorolt hatását (Besnard et al., 1996; Angers & Caron, 1998; Sarkhot et al., 2007; Kögel-Knabner et al., 2008; Juhos et al., 2021). A legtöbb tanulmány inkább növényi tulajdonságok befolyását, mintsem konkrét (fa)fajok aggregátumképződésére és stabilitására kifejtett hatását vizsgálja. Jelen munka ebben kíván előrelépést tenni, ezért két erdészeti jelentőségű, Magyarországon nagy területen gazdálkodásba vont fafaj, a kocsánytalan tölgy és a fehér akác termőhelyeit, illetve fátlan kontrollterületeket vizsgáltunk, hamis idősoros kísérlet keretében. A hamis idősor lehetővé teszi, hogy tetszőlegesen választott paraméterek (pl. a választott faállományok) befolyása mellett tanulmányozhassuk a talajfejlődés különböző fokozatait, egy időben. A szén-körforgásból közép- illetve hosszabb távra kikerülő szervesanyag-megoszlást

sűrűségkülönbség-alapú frakcionálással, míg az aggregátumokat és aggregátumstabilitást automatikus képanalízissel elemeztük. Szintén kiemelt figyelmet kaptak az aggregátumok ásványi építőelemeit jelentő elsődleges talajszemcsék is, amelyek méretcsoportonkénti százalékos megoszlását (a textúrát) kétféle, hagyományos Köhn-féle pipettás és hidrometrikus mérésekkel is meghatároztuk, ezen vizsgálati eljárások egybevetéséhez.

## 2. Célkitűzés, hipotézisek

A fehér akáccal folytatott előtanulmány (BSc-dolgozat) megállapításaira alapozva, kutatásunkat tehát egy második, Magyarországon az akácéval azonos termőhelyi és éghajlati viszonyok között, monokultúrában is ültetett, erdészeti jelentőségű fafajjal, a kocsánytalan tölgygel bővítettük. Célunk az volt, hogy a vizsgálataink nyomán vont következtetések minél jobban kiterjeszthetők legyenek általánosabb hazai viszonyokra; legalább a választott erdészeti klímakategóriában és termőhelytípuson.

Az előtanulmány tapasztalatai és a szakirodalomból nyert ismeretek alapján az alábbi hipotéziseket állítottuk fel:

*Hipotézis 1:* A hamis idősor alkalmazására több talajtani példa van. Feltételezésünk szerint általános talajfejlődési folyamatok tanulmányozásán túl, a módszer hozzásegíthet a két fafaj eltérő befolyásának megismeréséhez a talaj szervesanyag-megkötésében, illetve aggregátumdinamikájában.

*Hipotézis 2:* Stabil aggregátumok kialakulásához a megfelelő biotikus és abiotikus tényezőkön túlmenően elegendő idő is kell. A hosszabb élet- és vágási ciklussal rendelkező, többedik generációs, őshonos tölgyesek biológiailag aktívabbak (pl. talajfaunájukat tekintve) az akácültetvényeknél. Ebből következik, hogy ezeknek a tölgyeseknek talajában több és stabilabb aggregátum várható, mint a többedik generációs akácosokében.

*Hipotézis 3:* Az erdőborítás (és az ehhez köthető ritkább bolygatás) hatására javuló talajtulajdonságok elősegítik a természetes szukcesszió előrehaladását, ezért az első generációs erdőtelepítések talajában több aggregátum és hosszabb távon kötött szén várható, mint a fás vegetációval nem borított kontrollterületekében.

*Hipotézis 4:* A pionír vegetáció akár nyers, alacsony szervesanyag-tartalmú talajokon is megtalálja az életfeltételeit, és aktívan közreműködik a talajképződésben/fejlődésben. Ennek megfelelően az első generációs akácültetvények talajában több aggregátum és hosszabb távon kötött szén várható, mint az első generációs tölgyesekében.

### 3. Szakirodalmi áttekintés

#### 3.1. Az érintett fajok rövid bemutatása

##### 3.1.1. Fehér akác

A fehér akác (*Robinia pseudoacacia*) a pillangósvirágúak (*Fabaceae*) családjának bükkönyformák (*Faboideae*) alcsaládjába tartozó fafaja. Az eredetileg az atlantikus észak-amerikai flóraterületen (az USA délkeleti részén) honos növény (DeGomez & Wagner, 2001) hazánk legelterjedtebb fafaja, a KSH adatai szerint 2021-ben 459135 hektárnyi akácos erdőterület volt Magyarországon<sup>1</sup>. Egyike a legsokoldalúbban felhasználható „termesztett” növényeinknek, gazdasági jelentősége vitathatatlan, ugyanakkor inváziós hajlama miatt az EU korlátozásokat fogantatosított vele szemben<sup>2</sup>.

Pionír jellegéből kifolyólag számos termőhelyi szélsőséget tolerál, viszont a talaj szellőzőtségére igényes: a laza talajokat preferálja; sem a magas agyagtartalom okozta kötöttséget, sem a magas talajvízszint miatt fellépő levegőtleniséget nem kedveli (Járó, 1986; DeGomez & Wagner, 2001). Talaj-pH tekintetében tág tűrésű (bár optimuma a semleges közelében van), a mésztartalommal szemben szintén közömbös (DeGomez & Wagner, 2001). Óshazájában 1020 és 1830 mm közötti éves csapadékmennyiség mellett tenyészik, ugyanakkor már 550 és 650 mm közötti éves mennyiségek, illetve tavaszi és nyári száraz időszakok mellett is képes megtalálni az életfeltételeit (Mantovani et al., 2015). Járó és mtsai. (1986) az akác termőhelyigényére vonatkozó felmérés során úgy találták, hogy az akácot itthon 113 termőhelytípus-változaton lehet eredményesen termesztani, bár a jó eredményekhez jó tápanyag- és vízellátottság szükséges.

Gyökérzete leginkább a talaj felső 10–30 cm-es rétegében, a felszínnel párhuzamosan fut (Bartha et al., 2006). Gyökérgümőiben élő *Rhizobium* szimbióta-baktériumok a légköri molekuláris nitrogént oldható nitrogénvegyületekké alakítva teszik a gazdanövény számára is felvehetővé, ezzel ellensúlyozva a kedvezőtlen talajviszonyokat és a nedvességhiány okozta stresszt (Berthold et al., 2009; Mantovani et al., 2015). Kiemelkedő ökofiziológiai plaszticitásának és morfológiai adaptációjának háttere az aszály és a magas hőmérsékletek átvészelésére ugyanakkor csak részben tisztázott (Berthold et al., 2009; Mantovani et al., 2015; Li et al., 2021).

Azonos területen, több generáción keresztül akáctermesztés nyomán növekedés-visszaesés tapasztalható, amelyre a köznyelvben a „talajuntság” jelzőt szokták használni. Ennek hátterében

1 Forrás: [https://www.ksh.hu/stadat\\_files/kor/hu/kor0004.html](https://www.ksh.hu/stadat_files/kor/hu/kor0004.html) (elérés: 2022. 09. 26.)

2 Forrás: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/HU/TXT/HTML/?uri=CELEX:32014R1143&from=EN> (elérés: 2022. 09. 26.)



csak részben tisztázott komplex folyamat áll. Az akác, talajsavanyító hatásán túl hosszabb távon a növényi élethez fontos kicserélhető kationok és tápanyagok mennyiségének csökkenését, illetve a rhizoszféra bakteriális közösségének megváltozását okozza (Berthold et al., 2009; Li et al., 2021). A szakemberek ezeken túlmenően egyéb negatívan ható biológiai faktorok közreműködését (pl. patogének felszaporodása a rhizoszférában) is lehetségesnek tartják.

### **3.1.2. Kocsánytalan tölgy**

A kocsánytalan tölgy (*Quercus petraea*) a bükkfavirágúak (*Fagales*) rendjébe, ezen belül a bükkfafélék (*Fagaceae*) családjába tartozó fafaj. Közép-európai flóraelem, elterjedési súlypontjai az Alpok, Kárpátok (Eaton et al., 2016). A száraztól a friss vízgazdálkodású, közép- vagy mély sziklás váz- és agyagtalajok, illetve agyagtalajok fafaja; előbbire utal tudományos species-neve is, ugyanis a „*petraea*” kövit, sziklait jelent. Elviseli a gyengébb tápanyag-ellátású termőhelyeket, viszont a pangóvízes és változó vízgazdálkodású területeket a kocsányos tölgygel szemben elkerüli.

Magyarországon jellemzően a soványabb, szárazabb, délies kitettségű lejtők uralkodó fásszárú növénye. A középhegyégi lombdőkben alapvetően a cseres tölgyesektől (250 m) a gyertyános tölgyesek (650 m) övéig fordul elő (Bartha, 1999). Mérsékelt melegigényes, a hőmérsékleti szélsőségeket nem kedveli. Fokozott fényigénye okán Közép-Európában a némileg jobb termőhelyekről az árnyéktűrő, erősebb kompetitor bükk (*Fagus sylvatica*) kiszorítja a kocsánytalan tölgyet, amely ezekben az esetekben csak mint kísérő fafaj tud az állományban fennmaradni. Ennek megfelelően kizárólag valamilyen tekintetben speciális élőhelyeken képes uralkodóvá válni: mint kötöttebb agyagtalajokon gyertyános-tölgyesekben, illetve tápanyagokban szegény, száraz homoktalajokon a nyír-tölgyesek és erdeifenyves-tölgyesek esetében. Inkább mészkerülő; de a jó tápanyag-ellátású, üde, levegős talajokon, 600–700 mm éves csapadékmennyiségnél fejlődik jól (Járó, 1986). Karógyökere miatt felettébb viharálló. Levelei, ágai, fája sok csersavat (tanninok) tartalmaz (Harrison, 1971), gazdagon vetett lombja lassan bomlik le.

### **3.2. Hamis idősor**

Kutatásunkat hamis idősoros séma szerint (angolul "chronosequence") építettük fel, amely lényegesen egyszerűsíti az idő- és munkaigényes tartamkísérleteket (Kuráž et al., 2012). A módszer hasonló ökológiai tulajdonságú (mindenekelőtt klíma, termőhelytípus tekintetében), vagyis azonos kiindulási állapotú, de eltérő fejlődési fokú (korú) élőhelyek összehasonlításán alapszik (Johnson & Miyanishi, 2007; Walker et al., 2010). A kérdéses állapotváltozók vizsgálatához a különböző fejlődési stádiumú mintaanyagot térben különböző helyről vételezik, vagyis a térbeli különbséget időbeli (fejlődésbeli) különbségnek feleltetik meg (Huggett, 1998).

### **3.3. A talaj, mint polidiszperz rendszer és vizsgálata**

A talaj egy a talajképző tényezők hatására kialakuló polidiszperz rendszer. A folyékony és gáznemű fázisnál lényegesen kevésbé változó szilárd fázis összetevői rendkívüli változatossággal bírnak és tág méretspektrumot ölelnek fel; fontos és érdekes szerkezeti egységei az aggregátumok. Ezek ásványi és szerves eredetű anyagokból épülnek fel. Az ásványi rész jellemzésekor elengedhetetlen a szemcsék méretmegoszlásának ismerete; annál is inkább, mert ez a paraméter a legalapvetőbb talajtulajdonságokra is közvetlen befolyással bír. A szerves komponenseket a tudományos kérdésfeltevéséhez igazodva számtalan módon és aspektusból lehet vizsgálni.

#### **3.3.1. A talaj elemi összetevői (fizikai féleség)**

A primer (vagy elemi) ásványi alkotórészek, vagyis a homok, iszap (por) és agyagfrakció – melyeket legfeljebb erősen invazív roncsolással lehetne kisebb egységekre bontani – relatív arányát textúrának nevezik. A megfelelő szemcsészettség, – az ezzel összefüggésben kialakuló talaj szerkezeti elemek –, illetve az ezekből következő porozitás a feltétele annak, hogy adott talajban elég hely legyen a víznek, levegőnek, vagy épp a gyökereknek és a talajlakó állatoknak, ezért a textúra egyike a talajok legfontosabb talajfizikai paramétereinek. Nemcsak az életfolyamatokat befolyásolja, hanem azon túlmenően a szilárd, folyékony és gáznemű fázisok kölcsönhatásain keresztül a transzport- és raktározási folyamatokat is (Makó et al., 2017; Amelung et al., 2018). A talajképződés és -használat szempontjából a 2 mm-nél kisebb méretű egységek, szemcsék kapnak kiemelt figyelmet, mert jelentős mennyiségű nedvesség visszatartására képesek a nehézségi erővel szemben, amely egyúttal befolyással van a talajlevegő hányadára és mennyiségére is (Amelung et al., 2018). A részecskék felületmérete döntően befolyásolja a kémiai adszorpció- és kicserélődési folyamatok működését is; amelyet könnyű belátni, ha a csökkenő részecskeméret (vagy tömeg) mellett egyre növekvő fajlagos felület összefüggésére gondolunk. A textúrát alkotó elsődleges talajrészecskék átmérői hat nagyságrendbeli mérettartományba sorolhatóak.

#### **3.3.2. A talaj szerves anyagai**

A szakirodalom a szerves szén (SOC) legfőbb forrásaként az elhalt szerves anyagot (SOM) nevezi meg a talajban; vagyis az avart, az elhalt (főleg hajszáll-) gyökereket, illetve az azok által kiválasztott szerves vegyületeket és a gombahifákat (Godbold et al., 2006). A lebontás magas fokán álló, többé-kevésbé stabil szerves talajösszetevőket a kollodiális mérettartományban Hillel (2004) „humuszanyagként” definiálja; ugyanakkor mások munkáit tekintve látható, hogy a terminológia nem egységes. Ennek problematikáját Feller (1997) kimerítően tárgyalja.

### 3.3.3. Szervesanyag-tárolás (szénmegkötés) a talajban

„A talajt alapvetően két közvetett paramétere: szerves széntartalmának abundanciája (mennyiségi viszonyok) és minősége különbözteti meg a nyers kőzetek és üledékek anyagaitól. [...] a SOC az egyik legfontosabb terméke a talajképződésnek, alapvető talajökológiai folyamatok működtetője” áll az Európai Talajadat Központ (ESDAC) honlapján olvasható bevezetésben<sup>3</sup>.

Amelung és mtsai. (2018) munkájából ismeretes, hogy a teresztris szénkészlet mintegy 80%-a a talajokban található. Erdőterületek mezőgazdasági művelésbe vonása nyomán, illetve helytelen gazdálkodás következtében a SOC a potenciális kapacitásnál akár 20–50%-kal alacsonyabb lehet (Post & Mann, 1990; Davidson & Ackermann, 1993), és vice versa: mezőgazdasági területek (újra)erdősítése a SOC-készlet növekedését eredményezheti, szénmegkötés révén (Silver et al., 2000; Ross et al., 2002). Természetközeli erdei ökoszisztémákban az SOC mennyisége („SOC-density”, vagyis a SOC-koncentráció alakulása a talajban) magas, ugyanakkor a SOC-megkötés mértéke és módja (tartóssága) a klíma, a termőhely, az állományalkotó fafajok, a gazdálkodás módja, és az avar sajátságainak, kémiai összetevőinek komplex interakciói nyomán alakul (Lal, 2005; Fekete et al., 2014; Kotroczó et al., 2020). Joly és mtsai. (2017) megállapítják, hogy az egyes fafajok befolyással bírnak az avar bontásának módjára, leginkább fajspecifikus (mikro)környezetbeli változások előidézésével, ugyanakkor ezzel összefüggésben a diverzitás növelésének pozitív hatásait nem sikerült igazolniuk. Nem lebecsülendő az erdőgazdálkodás különböző módjainak hatása a SOC készlet alakulására, ugyanis egyes, a gazdálkodáshoz köthető tevékenységek (tipikusan a gyérítés, véghasználat, vagy az aljnövényzet eltávolítása) elkerülhetetlenül együtt járnak az SOC készlet csökkenésével is (Johnson & Curtis, 2001; Jandl et al., 2007; Grüneberg et al., 2013).

A talajba kerülő szerves anyagok (zömében heterotrófok által) végzett bontása és humuszanyagokká alakítása egyfajta differenciálással is jár: a nagyobb növényi maradványoknál lassan megy végbe, azok hosszabb ideig jól felismerhetőek maradnak a talajban. A lebontás előrehaladottabb fokán álló szerves törmelékek viszont az alábbi módokon hosszabb távra stabilizálódhatnak, és kikerülhetnek a szénkörforgásból (Golchin et al., 1994; Rumpel et al., 2003; Bossuyt et al., 2005; Schöning & Kögel-Knabner, 2006; von Lützow et al., 2006; Wagai et al., 2008):

1) Aggregátumok belsejébe zárva, amely során a SOM térben, fizikálisan elhatárolódik, így hozzáférhetetlenné válik szaprotróf mikroorganizmusok és enzimek számára.

---

<sup>3</sup> Forrás: <https://esdac.jrc.ec.europa.eu/themes/soil-sampling> (elérés: 2022. 09. 26.)

2) Ásványi szemcsék (főleg agyag) felületével kölcsönhatásba lépve, amely eredményeképp organo-minerális kötések keletkeznek (többértékű kationhidak, ligandumcserével megvalósuló kötések és szerves molekula-fémionok alkotta komplexek)

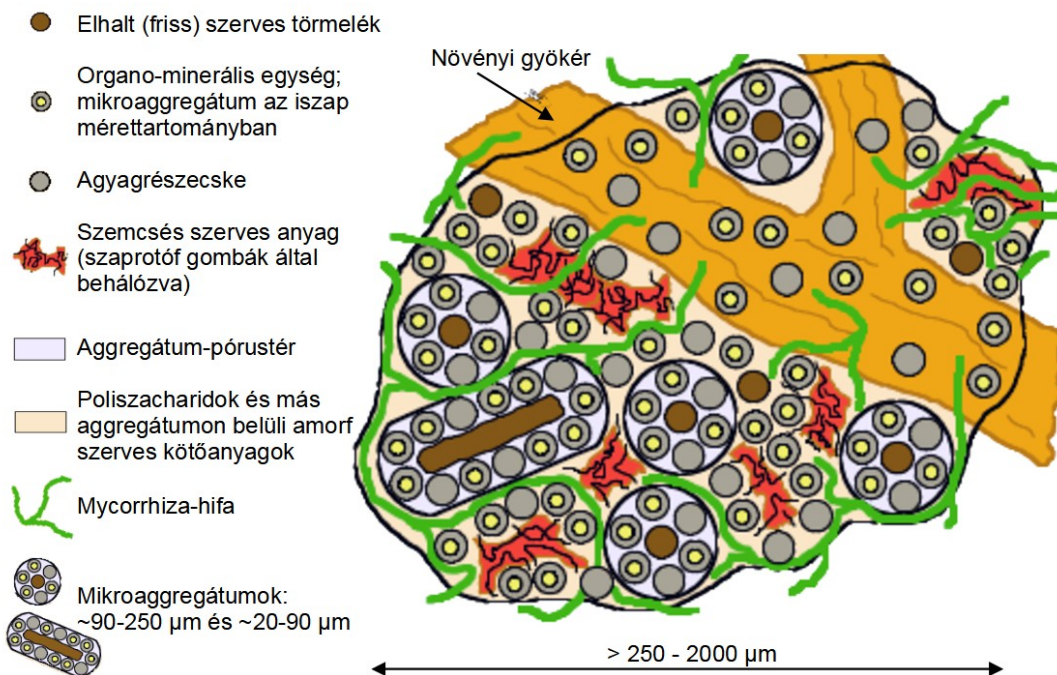
3) Kémiai perzisztenciával (elszénesedés – a dolgozatban nem tárgyaljuk)

Ezek a funkcionális SOM-csoportok laboratóriumi viszonyok között elkülöníthetők (ld. 3.4.2. pont: Anyag és módszer: Sűrűségkülönbség-alapú SOM-frakcionálás).

Állandó környezeti viszonyok mellett egyensúly alakul ki a SOM megkötésének és lebontásának mértékében, amely viszonylag állandó SOC-tartalmat eredményez a talajban (Stahr, 2019). A potenciálisan megköthető SOC nagysága ugyanakkor termőhelyspecifikus; nem egyszerűen csak a „bemeneti” SOM-mennyiségétől, vagyis pl. az éves szinten hulló avar mennyiségétől függ (Hassink, 1997); sokkal inkább a fenti, 1)–3) pontban megnevezett stabilizálási mechanizmusok működése a döntő. Nagy általánosságban, változatos talajtípusokat tekintve a potenciális SOC-megkötés az aktív ásványi felület nagyságával (→ agyag mennyisége), illetve a vasoxidok mennyiségével függ össze (Mayer, 1994; Kaiser & Guggenberger, 2000). Jastrow & Miller 1996-os, illetve Sarkhot, és mtsai. 2007-es munkájukban arról számolnak be, hogy a SOM akár 90%-a aggregátumokban kötve lehet, illetve erdőtalajok esetében maximálisan mintegy 50% ez az arány.

### **3.3.5. Aggregátumok definiálása**

Aggregátum (1. ábra) alatt szemcsés talajösszetevők egy olyan csoportját értjük, amelyek jóval szorosabban kötődnek egymáshoz, mint más, szomszédos talajszemcsékhez és aggregátumokhoz (Martin et al., 1955; Hartmann, 2008). Six és mtsai. (2004) olyan térben definiálható struktúraként ragadják meg őket, amelyek ásványi részecskéből, szerves bevonatokból és szemcsés szerves törmelékekből épülnek fel.



1. ábra. Talajaggregátumok felépítésének és hierarchiájának sematikus ábrázolása (módosítva). (Jastrow & Miller, 1996)

### 3.3.6. Az aggregátumok szerepe és jelentősége

Az aggregátumok szerepe meglehetősen összetett: felületük különböző szorpciós és deszorpciós folyamatoknak ad helyet, így a szén mellett tápanyagok tárolásában, illetve azoknak a növények számára felvehető formába alakításban is szerepet játszanak (Linguist et al., 1997). Heterogén térbeli elhelyezkedésükkel (Werner et al., 2017) függ össze a tápanyagok egyenlőtlen megoszlása/elérhetősége adott termőhelyen (Hildebrandt, 1994; Lehmann et al., 2007). Az aggregátumok, mint biológiai hotspotok is jelentősek: Schack-Kirchner és mtsai. (2000) arról számolnak be, hogy az aggregátumok felülete nagyobb mértékben átszótt gyökerekkel, gombahifákkal és mikroorganizmusokkal mint más, környező talajterületek. Az organo-minerális egységen belül, illetve azok között aerob- és anaerob zónák váltakoznak, amelyek közvetlen khatással vannak adott termőhely mikroorganizmusainak adundanciájára és diverzitására is (Kim & Crowley, 2013; Mummey & Stahl, 2004); megjegyzendő ugyanakkor, hogy az agyag- és homokszemcsék részaránya szintén lényegesen befolyásolhatja a mikrobiális viszonyokat (Chenu et al., 2001).

Az aggregátumok karakterisztikus funkcióval bíró talajösszetevők (Hartmann, 2008), ugyanis közvetlen befolyással bírnak a szerkezetre, és ezen keresztül a talaj alapvető működésére, az edafonra, a gyökérvnövekedésre és a környezetre (Bronick & Lal, 2005; Meurer et al., 2020), de a talajok mechanikai terheléssel szembeni ellenállására is (Amelung et al., 2018). A szerkezet a talajt alkotó szilárd egységek és a köztes terek (pórusok) fizikális tulajdonságait, vagyis ezek

térbeli-, méret- és forma szerinti megoszlását, illetve összefüggését írja le (Meurer et al., 2020). Nem véletlenül nevezte a régebbi talajfizikai szakirodalom a megközelítőleg azonos méretű (egyöntetű) szemcsékből álló talajokat szerkezet nélkülieknek. A talajszerkezet mérésére „számszerűsítésére” annak összetettsége, illetve kompozit jellege (az összetevők különbözősége) miatt eddig nem született objektív, univerzálisan alkalmazható módszer (Hillel, 2004). Révén a kedvező talajszerkezet és a magas aggregátumstabilitás szoros kapcsolatban állnak egymással (Amézketa, 1999; Bronick & Lal, 2005), az aggregátumstabilitás az egyik legfontosabb szerkezethez köthető mérhető indikátor (Six et al., 2000). Szintén ebből következik, hogy a talajszerkezet (mint dinamikus és sérülékeny talajtulajdonság) leginkább az aggregátumok jellemzőin keresztül magyarázható (Bronick & Lal, 2005, Ghezehei, 2012).

Az 1930-as évekig a talajszerkezet és a talajtextúra szinonim fogalmak voltak; azt követően talajszemcsék agglomerációját tanulmányozva az agyagrészecskék körében megfigyelhető flokkuláció kapcsán a flokkulációval azonosították az aggregátumképződést (Ghezehei, 2012). Ma már ismeretes, hogy a tisztán kémiai háttérű flokkulációval szemben az aggregátumképződés során a (flokkulált) szemcséket valamilyen ragasztóanyag tartja egybe (Six et al., 2004).

### **3.3.7. Az aggregátumok keletkezése és kötőanyagaik**

Az aggregátumok létrejöttének háttérében a talajszemcsék egyfajta természetes szerveződése áll; stabilitásukat és keletkezésüket főként biotikus tényezők, illetve az alapkőzet, az elsődleges talajösszetevők, valamint más abiotikus tényezők szabályozzák/befolyásolják (Amézketa, 1999; Six et al., 2002; Six et al., 2004; Bronick & Lal, 2005; Kayser et al, 2019).

A legfontosabb biotikus tényezők közé a mikrobiális aktivitás (Lynch & Bragg, 1985; Oades, 1993; Ashman et al., 2009), a gyökerekkel és hifákkal való átszőttesség (Angers & Caron, 1998; Deneff et al., 2001) és a talajfauna-tevékenységek (Bossuyt et al., 2005), illetve az ezek mindegyikéhez köthető biológiai ragasztóanyagok jelenléte (nyálkák, váladékok stb.) sorolható. E változatos élőlénycsoportok komplex tevékenysége nyomán a (kollodiális) szerves törmelék leginkább „agyag-domain”-ekhez (flokkulált agyagrészecskék) és/vagy finom iszap szemcsékhez kapcsolódva „cluster”-eket (organo-minerális egységek egyszerű csoportjait) képez; majd ilyenek egymáshoz kapcsolódásával aggregátumok jönnek létre (Ghezehei, 2012). A SOM önmagában, a fentebb tárgyalt aktív biológiai átalakító folyamatok megléte nélkül csekély hatással van az aggregátumképződésre (Hartmann, 2008).

Az abiotikus faktorok hatása meglehetősen összetett. A legtöbb környezeti hatás mint a hőingás, fagyhatás inkább a struktúraképződés ellen hatnak (Edwards, 2013), ugyanakkor a ciklikus átnedvesedés-száradás elősegítheti az aggregátumok képződését, illetve növeli stabilitásukat

(Emerson, et al., 1986; Deneff et al., 2001; Bronick & Lal, 2005). Számos talajjellemző direkt befolyással bír az aggregátumképződésre: a textúra, azon belül is a nagyobb agyagmennyiség, illetve a nagyobb kation-kicserélési kapacitás elősegíti az aggregátumképződést (Boix-Fayos et al., 2001; Hillel, 2004; Bronick & Lal, 2005; Dimoyiannis, 2012). Durvább szövetű talajok esetében legfőképpen a SOC mennyisége szabályozza az aggregátumképződést (Kay, 1998). A szabad, másodlagos (pedogén) mész változatos módon hathat az aggregátumképződésre és stabilitásra. Durván 5%, vagy azt meghaladó SOC jelenlétében a mész befolyása a aggregátumképződésre mérsékelt (Boix-Fayos et al., 2001), ugyanis a SOC mértékének növekedése a talajban elősegíti a mész oldódását, majd későbbi kicsapódását (Bronick & Lal, 2005; Virto et al., 2011). Ugyanakkor Boix-Fayos és mtsai. (2001) úgy találták, hogy alacsony SOC-koncentráció mellett a makroaggregátumok stabilitása mész jelenlétében növekedett.

### **3.3.8. Az aggregátumok és pórusok hierarchiája**

Az aggregátumok nagysága széles tartományban mozog, ugyanakkor a méret számos tulajdonságukra kihatással van, ezért a mikro- (< 250  $\mu\text{m}$ ) és makroaggregátumokat (> 250  $\mu\text{m}$ ) többnyire külön tárgyalják (Edwards & Bremner, 1967). Keletkezésük és szerveződésük (egyszerűtől az összetettebb irányába) kapcsán hierarchia érvényesül (Tisdall & Oades, 1982), ugyanakkor az nem szükségszerűen kronológiai sorrendben kell történjen (Oades, 1984). Vagyis gyakori, hogy elsődleges ásványi szemcsék, vagy azok alkotta „cluster”-ek (tipikusan 2–20  $\mu\text{m}$  közötti nagyság) rövidtávon ható (biológiai) kötőanyagok hatására makroaggregátumokat képeznek, amely átmeneti összekapcsolódás teremti meg a feltételeit igen stabil mikroaggregátumok létrejöttének (kialakulásuk lassabb), egy-egy makroaggregátumon belül (Gale et al., 2000; Six et al., 2004). Elliott & Coleman, (1988) a mikroaggregátum-képződés okait a makroaggregátumok belsejében kialakuló anaerob (és ezáltal redukáló) körülményekkel magyarázzák. Az átmeneti kötőanyagok lebomlása után a makroaggregátumok sokszor szétesnek, míg a mikroaggregátumok tovább fennmaradnak (Elliott, 1986). A makroaggregátum-körforgás vagyis szétesésük és újrakeletkezésük körülményei döntően befolyásolják a SOC hosszútávú stabilizálását a talajban (Six et al., 2004). Oades & Waters, 1991 arról számolnak be, hogy magas szervesanyag-tartalmú talajok esetében a fentebb tárgyalt hierarchikus aggregátum-csoportok többnyire teljes spektruma megtalálható.

A nagyobb (tipikusan > 25 mm), természetes eredetű talajrögöket, – amelyek szintén viszonylag tartós aggregátum-képződmények – az angol szakirodalom „ped”-ként ("soil peds") emlegeti (Jahn et al., 2006); ezek üregek, nagyobb repedések mentén határolódnak el egymástól. Keletkezésük hátterében a nedves-száraz ciklusok váltakozása áll, szemben az antropogén (→ talajművelés) eredetű rögöktől ("clods") (Ghezzehei, 2012).

Az aggregátum-hierarchia elmélet ihlette az annak „tükörképeként” is emlegetett pórushierarchia modellt, amely négy kategóriát különít el (Six et al., 2004), ezek sorrendben: a (1) makropórusok, (2) makroaggregátumok közötti pórusok, (3) makroaggregátumokon belüli, illetve mikroaggregátumok közötti pórusok és a (4) mikroaggregátumokon belüli pórusok. Ezen hierarchikus rendszerek segítségével számos a talaj és edafon működésével kapcsolatos komplex folyamat vagy zavar jobban megmagyarázható, illetve érthetőbbé válik (Ghezehei, 2012), ugyanis e hierarchikus rendben bekövetkező változások legtöbbször ökológiai változásokat is eredményeznek. Például a valamilyen zavar/zavarás nyomán bekövetkező humuszvesztés gyökeresen más termőhelyi viszonyokat teremt. A talaj pórusterének átalakulása szintén érezhető változásokat eredményez, ugyanis a talajt érő mechanikai hatások legtöbbször a mikroaggregátumok közötti érzékeny összeköttetéseket rombolják, amely a makroaggregátumok arányának csökkenését eredményezi a „függetlenedett” mikroaggregátumok számának megnövekedésén keresztül (Oades & Waters, 1991). A mikroaggregátumok közötti finom pórusok kiemelt jelentőséggel bírnak a nedvességvisszatartás, az edafon oxigénhez jutása, és a csírázás/gyökérnövekedés szempontjából (Ghezehei, 2012). A póruster jellemzői kiemelt befolyással bírnak az erózió és a felületi elfolyás mérséklésében (Barthes & Roose, 2002), a nedvesség hatékonyabb elvezetésén keresztül (Weiler & Naef, 2003).

### **3.3.9. Az aggregátumok tartóssága**

Az aggregátumok fennmaradási idejével kapcsolatban kevés ismeretünk van (Totsche et al., 2018), becslések szerint a mikroaggregátumok átlagosan 100 és 300 év közötti időtávlatban maradnak fenn, míg a makroaggregátumok (illetve az abban tárolt szén) élettartamát 15–50 év között határozzák meg (Besnard et al., 1996; Totsche et al., 2018; Puget et al., 2000; John et al., 2005; Lobe et al., 2011) Általánosságban tehát az aggregátumstabilitás, illetve azok fennmaradási ideje a mérettel fordítottan arányos (Totsche et al., 2018).

## **3.4. A négy legfontosabb vizsgálati eljárás rövid áttekintése**

### **3.4.1. Textúra-meghatározás**

A fizikai féleség (más szakterületek, társtudományok esetében a mechanikai összetétel) vizsgálatára napjainkban párhuzamosan több minta-előkészítési- és mérési módszer is használatban van (Makó et al., 2017; Makó et al., 2017c). A finom frakciók (agyag- és iszapfrakciók) laboratóriumi szemcseösszetétel-vizsgálatára nemzetközi viszonylatban két fő irányzat terjedt el: a szedimentációs-, és az optikai elvűek. (Utóbbiak nagyobb szemcsék, aggregátumok vizsgálatára is használhatóak.) Immáron mindkét csoport tagjai több fejlesztésen



estek át, de hátrányai vagy hibái miatt egyik sem tudott a másikon egyértelműen felülkerekedni. Eltérő módszerrel végzett vizsgálatok eredményei viszont nem feleltethetőek meg közvetlenül egymásnak; azok konverziója regressziós egyenletekkel lehetséges (Kun et al., 2013; Makó et al., 2017b; Igaz et al., 2020; Mátra et al., 2022). A megfelelő reprodukálhatóság érdekében a szakemberek a standardizált előírások szigorú betartását, és az alkalmazott előkezelési- és mérési eljárások, illetve a frakcióhatárok eredményekhez kapcsolt mindenkori közlését javasolják (Hartge & Horn, 1999, Makó et al. 2017), ugyanis minta-előkészítés (előkezelés) képezi ezen vizsgálatok egyik neuralgikus pontját (Makó & Hernádi, 2010). Korrekt eredményekhez fontos a bemért szárazanyagon belül az elsődleges ásványi összetevők mennyiségének minél precízebb közelítése, ezért az adszorbeált felületi nedvességtartalommal, és a humusztartalommal is korrigálni kell a mintatömegeket. Előbbi a minták légszáraz (40 °C) és abszolút száraz (105 °C) állapota közötti tömegdifferencia; utóbbi az egyes minták szerves szén-tartalmának % [m/m] az 1,72-es empirikus értékkel képzett szorzatával képezhető (Amelung et al., 2018). Bár egyes mérési protokollokban szerepel, erdőtalajok textúravizsgálata kapcsán sokan megkérdőjelezik a sósavas kezelés létjogosultságát, ugyanis a kalcium-karbonát szemcsék a homok és az iszap frakciók részét képezik (Dimoyiannis, 2012). A megfelelően kivitelezett hidrogén-peroxidos kezelés a legtöbb mésztől kötött aggregátumot is felbontja (Schulte et al., 2015), vagyis egy ezen felüli sósavas roncsolás a szemcseméret-megoszlást a finomabb tartományok javára torzítaná.

Valamennyi szedimentációs eljárás Stokes 1951-ben felállított törvényén nyugszik, amely a részecskék (ekvivalens átmérővel leírt) méretét azok folyadékban történő süllyedési sajátságai alapján számítja ki (Durner & Nieder, 2004). Ezen vizsgálati típusok közé sorolható a hidrométeres (más néven areometrikus), a (Köhn-féle) pipettás, a Röntgen-szedimentációs, és az elektro-hidrosztatikus (Pario®/ISP) módszer, illetve ennek továbbfejlesztése, a Pario® plus/ISP+ is. A pipettás vizsgálat gyakorlati megvalósítását az ISO 11277 szabvány, illetve König és mtsai. (2005) is részletesen tárgyalják. A Pario® készülék a szemcseméret-megoszlást automatikusan, a minta hidrometrikus nyomásváltozásaiból kalkulálja, a felhasználó által definiált frakcióhatárok szerint. A nyomás adatok (esetleges hőmérséklet-változással korrigálva) 10 másodpercenként kerülnek rögzítésre. A (lamináris) ülepedés során a szuszpenzióban végbemenő nyomásesésből a szoftver matematikai modell segítségével becsli a minta szemcseösszetételét (Durner et al., 2017). A vizsgálat konstans hőmérsékleti viszonyok mellett végezhető, a maximális megengedett hőmérsékleti ingás a mérés közben  $\pm 1,5$  °C. Az optikai-elvű eljárások rövid áttekintése a 3.4.3. pontban olvasható.

### 3.4.2. Sűrűségkülönbség-alapú SOM-frakcionálás

A talaj szervesanyag-készletét (SOM) e módszerrel frakciókra különíthetjük el annak érdekében, hogy a kutatás céljaihoz igazítva, egyszerűsítve megismerhessük a talaj szén-dinamikáját. Különböző tudományos kérdésfeltevésekhez igazodva különböző frakcionálási eljárások léteznek<sup>4</sup>. Ezek általánosságban segíthetik a talajban a szerves szén (SOC) stabilizálásához kapcsolódó folyamatok megértését, a potenciálisan labilis (nem, vagy gyengén kötött) SOC, illetve ezen keresztül a rövid távon felvehető (makro)tápelemek kvantifikálását (Crow et al., 2007). Szintén lehetővé teszik (hosszú távú) szénkörforgás-modellek kalibrálását, inicializálását, vagy ezeknél a környezeti változásokból eredő módosulások feltárását (Zimmermann et al., 2007).

A Golchin és mtsai. (1994) által kidolgozott frakcionálási séma az egyik legáltalánosabban elterjedt, más módszerek alapjául is szolgáló eljárás (Plaza et al., 2019). A módszer a talajösszetevők sűrűségkülönbségét kiaknázva, (elviekben) csak mechanikai energiaközlést alkalmazva működik, vagyis nem befolyásolja a későbbi kémiai analízis eredményeit. Talajvizsgálati felhasználás esetén ásványi összetevők sűrűségére általánosságban a kvarcét  $\rho = 2,65 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$  használja a szakma (megállapodás értelmében), míg a (szemcsés) szerves talajösszetevők (POM)  $\rho < 1,5 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$  sűrűségűek (Blake, 2008). Utóbbi határértéknél magasabb sűrűségű folyadékban szuszpendált szerves összetevők a minerális résztől fizikálisan elkülönülnek, ezért a módszer  $\rho = 1,6 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$  folyadéksűrűséget javasol.

A Golchin-módszer a fentiek alapján az alábbi szabad, és a talaj ásványi részeivel kölcsönhatásban álló kötött SOM-frakciókat különíti el:

- fLF: szabad, könnyű, szemcsés frakció: a szervetlen egységek és aggregátumok között szabadon fellelhető, viszonylag friss, a lebontás alacsony fokán álló alacsony sűrűségű szerves fragmentumok;
- oLF: kötött, könnyű, szemcsés frakció: makroszkopikusan még többnyire felismerhető szerves maradványok alkotják, ahol az alacsony sűrűségű szerves töredékek aggregátumok belsejébe vannak zárva, amelyek anyagai több évtizeden át fennmaradnak (Yamashita et al., 2006);
- HF: nehéz frakció: a mikrobiális bontás magas fokán álló amorf szerves anyagok, amelyek igen nagy erővel kötődnek valamilyen minerális egység felületéhez. Ebben a formában néhány évtizedtől akár egy évezreden át is fennmaradhat (Baisden et al., 2002).

<sup>4</sup> Forrás: <https://www.somfractionation.org> (elérés: 2022. 09. 26.)

A frakcionálás révén explicit számszerűsíthetővé válik a szabad-, illetve közép és hosszú távra kötött szervesanyag-készlet mennyisége. Továbbá kvalitatív módon (pl. a frakciókhoz köthető tápanyagokon keresztül) is összehasonlíthatóak a vizsgálatba vont termőhelyek SOM-készletei. A kötés erősségével arányosan egyre nő a szén-körforgásból való kizáródás ideje is, ugyanakkor leírták, hogy a középtávon kötött szerves készlet (oLF) helytelen talajművelés hatására könnyen el is veszhet<sup>5</sup>. A HF még az erős fizikai behatásoknak is ellenálló, legtartósabb organo-minerális egységek csoportját takarja.

A módszer egy összetett, de jól alkalmazható eljárást kínál talajok szervesanyag-készletének a megkötés tartóssága szerinti csoportosítására, ugyanakkor a precíz kivitelezés ellenére megvannak a maga (labortechnikai-jellegű) korlátai. Éppen ezért lényeges a potenciális és valós hibalehetőségeket ismerni. Az egyik legkritikusabb lépés a valamennyi frakciót érintő mintamosás, ahol a már elkülönített frakció nátrium-poliwolframáttól való megtisztítása történik. Bár ez a só, hasonlóan a szintén a tisztítási folyamatban alkalmazott üvegszál-bázisú szűrőkoronghoz sem szenet, sem tápelemeket nem tartalmaz, esetleges visszamaradásuk a mintatömegre való befolyás miatt torzíthatja az eredményeket. A nátrium-poliwolframát jelenlétét a mosófolyadék (desztillált víz) elektromos vezetőképességén keresztül szokás vizsgálni; a könnyű frakciók mintáiból legtöbbször szinte maradéktalanul eltávolítható. A HF-nél viszont a mosófolyadékkal bizonyos (a szemcseméret-megoszlástól függő) mennyiségű mintaanyag is előtérésre kerül (Plaza et al., 2019), legfőképpen mert az agyag mérettartományba eső organo-minerális komplexek egy része még a centrifugálást követően sem ülepszik le. Ráadásul a protokollban szereplő  $< 200 \mu\text{S}/\text{cm}$  határérték eléréséhez sokszor meg kell ismételnünk a mintamosást. Crow et al. 2007 a filtrációs lépések után néha fellépő csekély mértékű oldott szervesanyag-vesztésről írnak le, amely a nátrium-poliwolframát oldat sötétebbre színeződésén keresztül is tetten érhető. Ehhez a jelenséghez kapcsolható a szintén Plaza és mtsai. (2019) által leírt, a nehéz frakcióban (HF) tapasztalt N-kontamináció; amely egyes esetekben nem megfelelő forrásból származó, vagy újrahasznosított nátrium-poliwolframát oldat alkalmazása nyomán lépett fel.

### **3.4.3. Optikai elvű szemcsevizsgálatok**

Az optikai elven működő szemcseanalizátorok immár több évtizedes múltra tekinthetnek vissza; eredendően anyagtechnológiai vizsgálatokhoz fejlesztették őket. Talajtani gyakorlatban leginkább a lézerdiffrakciót és a dinamikus képanalízist alkalmazó rendszerek terjedtek el. Ezek legfőbb előnye a gyorsaság, valamint, hogy megfelelő kiegészítővel a szuszpenziókon túl szilárd

---

5 Forrás: <https://www.somfractionation.org/physical-methods/density-golchin> (elérés: 2022. 09. 26.)

anyagok mérésére is használhatóak, a felhasználó által egyedileg megszabott részletességű osztályozást lehetővé téve.

Számos gyártó foglalkozik lézerelhajlásos (lézerdiffrakciós) elvű berendezésekkel, amelyek szemcsék (pl. az elemi részecskék) ekvivalens átmérőjének gyors meghatározásához használatosak, ugyanakkor többkomponensű minták (pl. az aggregátumok) mérésére a komponensek eltérő törésmutatói miatt csak korlátozottan alkalmasak. Különböző gyártók készülékei között jelentősebb technikai eltérések lehetnek, amely szintén befolyásolhatja a kapott szemcseméret-megoszlást (Makó et al., 2017c). A műszaki különbségek leginkább a fényforrás-, vagy fényforrások típusát (alkalmazott hullámhossz), a lézersugár továbbításának módját, az optikai rendszer kialakítását, és az alkalmazott detektorok fajtáját és számát érintik. A vizsgálatok szabványos végrehajtását az ISO 13320 norma rögzíti.

A dinamikus képanalízis valamely fényforrás előtt elhaladó részecskékről készített fotósorozatok (másodpercenként akár 500 kép) kiértékelésén alapszik<sup>6</sup>. Révén minden egyes, – a mérőcellán áthaladó – szemcséről több irányból készül felvétel, a méret mellett a morfológiára (formára, geometriára) vonatkozó paraméterek is rögzíthetőek<sup>7</sup>. A dinamikus képanalízissel történő szemcsevizsgálat norma szerinti végrehajtását az ISO 13322-2-es szabvány rögzíti. Ezek az eszközök a talajtani gyakorlatban az elsődleges ásványi részecskéken túlmenően aggregátumok vizsgálatára is jól alkalmazhatóak.

A QicPic automatikus képanalizátor-rendszer (Sympatec GmbH, Clausthal-Zellerfeld) lehetővé teszi az ekvivalens átmérő ( $x_{EQPC}$ ) mérésén túlmenően a szemcseméret-megoszlások kumulált- vagy gyakoriság szerinti ábrázolását; illetve egyebek mellett a mintatestek konvexitásának vagy gömbszerűségének számszerűsítését is. Talajtani kutatásra különösen alkalmassá teszi, hogy a mérést követően az adatok legkisebb Feret-átmérő ( $Feret_{min}$ ) szerint csoportosíthatóak, amely megfeleltethető a szitálással nyert átmérő-csoportoknak (Hartge & Horn, 1999). Feret-átmérő alatt egy test (részecske) két párhuzamos érintőtengelyének távolságát értik, véletlen elhelyezkedésű leképezés mellett (Merkus, 2009). A  $Feret_{min}$  meghatározása kellően sok irányból, kellő számú Feret-átmérő mérést követően, a részecskénél mért legkisebb érték kiválasztásával történik. Szabálytalan formájú részecskék esetében a Feret-átmérő nagyobb variabilitást mutat, mint gömbszerűek esetében; vagyis a  $Feret_{min}$  mindig lényegesen alacsonyabb értéket ad, mint a szóban forgó részecske ekvivalens átmérője. A legtöbb optikai elvű mérőeszköz által használt ekvivalens átmérő számítása az alábbi képlet szerint történik<sup>8</sup>;

6 Forrás: <https://www.sympatec.com/de/partikelmesstechnik/sensoren/dynamische-bildanalyse/> (elérés: 2022. 09. 26.)

7 Forrás: <https://www.microtrac.de/de/produkte/partikel-groesse-form-analyse/dynamische-bildanalyse> (elérés: 2022. 09. 26.)

8 Forrás: <https://www.sympatec.com/de/partikelmesstechnik/glossar/partikelform/> (elérés: 2022. 09. 26.)

ahol  $A$  a valódi szemcse detektált felületnagysága:

$$x_{EQPC} = 2\sqrt{\frac{A}{\pi}} \quad (1)$$

Aggregátumok vizsgálatánál a digitális dinamikus képanalízis nyújtotta forma-faktorok közül az egyik leginformatívabb a sfericitás vagy gömbszerűség ( $S$ ). Ez az arányszám a vizsgált szemcse leképezett, kétdimenziós (ekvivalens) felületnagyságához tartozó kör kerületének ( $P_{EQPC}$ ) és a valódi kerületnek ( $P_{valós}$ ) a hányadosa (Hentschel & Page, 2003); ahol az előzőekhez hasonlóan az  $A$  a detektált felületnagyság:

$$S = \frac{P_{EQPC}}{P_{valós}} = 2\frac{\sqrt{\pi \cdot A}}{P_{valós}} \quad (2)$$

Az így kapott hányados ( $S$ ) 0 és 1 közötti értékeket vehet fel;  $S = 1$  a tökéletes gömb sfericitása.

A Feret-átmérőre alapozva az alábbi képlettel meghatározható a szemcsék térfogat szerinti kumulatív megoszlása ( $Q_3$ ), valamely  $x_i$  méretcsoportban/kvantilisnél („Quantil”) (Stieß, 2009):

$$Q_3(x_i) = \frac{N_i}{N} \quad (3)$$

ahol  $N_i$  azon szemcséknek a száma, amelyek a vizsgálat során megadott  $x_i$  átmérőnél kisebbek, vagy azzal egyenlőek (méretcsoport),  $N$  pedig a vizsgálatban detektált össz-szemcseszám. (Az  $x_i$  méretcsoport a szemcsék ekvivalens átmérője alapján kerül definiálásra.) Az aggregátumok megközelítőleg konstans sűrűségét feltételezve ez a megoszlási adat megfeleltethető a nedves szitálással nyert adatoknak (Kayser et al., 2019). Az ebből levezetett gyakoriság szerinti megoszlás („megoszlási sűrűség”) a kumulatív megoszlás emelkedését írja le valamely méretcsoporton belül, az ISO 9276-1 szerint, az alábbi képlettel:

$$q_r(x_{gk}) = \frac{\Delta Q_3 \cdot 2,3}{\ln\left(\frac{x_f}{x_a}\right)} \quad (4)$$

ahol  $x_{gk}$  az  $x_a$  (alsó) és  $x_f$  (felső) értékekkel határolt méretcsoport geometriai közepét jelöli,  $\Delta Q_3$  pedig a szemcseméret-differenciát az alsó és felső méretcsoport-határok között. A szemcseméret-megoszlási adatok jobb áttekinthetőségéhez használatosak a kvantilisek ( $D_x$ ), amelyek azt az átmérőt jelölik, amelynél a részecskék  $x$  százaléka kisebb (Kayser et al., 2019).

A szemcse-térfogattal súlyozott átlagos szemcseátmérő („Volume Mean Diameter”,  $VMD$ ), más szavakkal az a szemcsenagyság, amelynél a térfogatuk szerint sorba rendezett szemcsék fele kisebb, az alábbi képlettel számítható (Merkus, 2009):

$$VMD = \sum_{i=1}^n \bar{x}_i \cdot q_3(\bar{x}_i) \cdot (x_{f,i} - x_{a,i}) \quad [\mu m] \quad (5)$$

ahol  $n$  a szemcseméretcsoportok száma,  $\bar{x}_i$  valamely szemcseméretcsoport számtani közepe, és  $x_{a,i}$  ennek a csoportnak az alsó-,  $x_{f,i}$  pedig a csoport a felső határát jelöli.

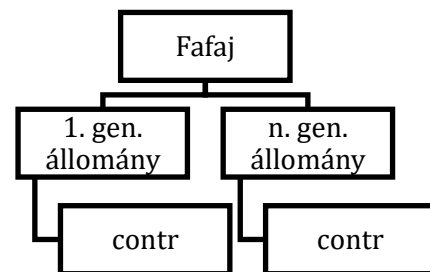
#### **3.4.4. Aggregátumstabilitás-vizsgálatok**

Az aggregátumstabilitást, mint indikátort széles körben használják egyebek mellett talajok eróziós hajlamának, egészségi állapotának felméréséhez; ugyanakkor az aggregátumok változatossága és tág méretspektruma miatt, illetve a különböző tudományos kérdésfeltevésekhez igazodva több bejáratott vizsgálati eljárás és stabilitási mutató létezik (Amézketa, 1999; Almajmaie et al., 2017; Jakab et al., 2019; Labancz et al., 2021). Valamennyi módszer az energiaközlés hatására a kiindulási állapothoz képest bekövetkező változás (→ aggregátum-szétesés) mértékét igyekszik megragadni (Almajmaie et al., 2017). Amézketa (1999), illetve Almajmaie és mtsai. (2017) az eljárások standardizálását szorgalmazzák, amelyet az ISO 10930 nemzetközi szabvány a nedves szitálásos vizsgálat esetében meg is tesz; tekintve, hogy az aggregátumok vízzel szembeni stabilitásának vizsgálata a leggyakoribb talajtani kutatásoknál. Ezzel több szemcseméret-csoportban, többlépcsős energiaközlést alkalmazva tetszőleges részletességű információ nyerhető, ugyanakkor a szitasorral kivitelezett vizsgálatok munka- és időigénye magas. A digitális dinamikus képanalízis nyújtotta technikai háttérrel, illetve a Sucecell-modulba integrált ultrahang-egység használatával jelentősen leegyszerűsíthető az aggregátumstabilitás-vizsgálat (Kayser et al., 2019). Alkalmazásával a nedves szitálásnál vizsgált paraméterek lényegesen egyszerűbben előállíthatóak. A módszer sok részecske szétesési mintázatának, illetve formaparaméterének (szfericitás) egybevetésén keresztül teszi lehetővé az aggregátumstabilitás-vizsgálatot, ugyanakkor az energiaközlés nyomán bekövetkező változások a szemcseméret-megoszlási görbéken is nyomon követhetőek (Kayser et al., 2019).

## 4. Anyag és módszer

### 4.1. A kísérlet felépítése

A kutatásba vont helyszínek kiválasztása a hamis idősoros séma szempontjai szerint, az Országos Erdőállomány-Adattár segítségével történt; rögtön kizárva a domborzati, illetve fekvés, lejtők okozta szélsőségeket is. Valamennyi termőhely cseres-kocsánytalan tölgyes erdészeti klímába tartozó, lösz alapkőzetű, középmező/mély termőrétegű (40–100 cm közötti gyökerekkel behálózható mélység) Ramann-féle barna erdőtalaj (Cambisol (IUSS WRB, 2015)) volt. Ezekben belül olyan kocsánytalan tölgy és fehér akác dominálta termőhelyeket választottunk, ahol: (1) a fás vegetáció közelmúltban történt erdőtelepítés nyomán „újjonnan” került a területre, illetve (2) már több generáció óta jelen volt (több vágásfordulón van túl). Vagyis az (1) esetben a mintaterületek az erdősítést megelőzően más művelési ágúak voltak, a (2) esetben pedig már többször történt a területen véghasználat (2. ábra). Ezeket a dolgozat elkövetkező részében mint (1) első = "1." és (2) többedik = "n." generációs állományokat tárgyaljuk. A (3) csoportot az egyes erdőrészek szomszédságában/közeliében mintázott fátlan kontrollterületek képezték (az ábrákon és táblázatokban „contr”-lal jelölve): ezek reprezentálták a fás vegetáció hatásaitól mentes kiindulási állapotot, vagyis a hamis idősor origóját. (Itt kell megjegyeznünk, hogy a koppányszántói fiatal tölgyes esetében 20% csertölgy is volt az állományban, de más tekintetben ez a mintaterület is megfelelt a kutatás támasztotta követelményeknek. A talajminta-vételezés ott is kizárólag kocsánytalan tölgy egyedek szomszédságában történt.) Az egyszerűség kedvéért a két fajtát a továbbiakban röviden mint akácot és tölgyet tárgyaljuk. A kutatással érintett minta- és kontrollterületek legfontosabb adatait összefoglalva, a Függelék F1. és F2. táblázatai tartalmazzák.

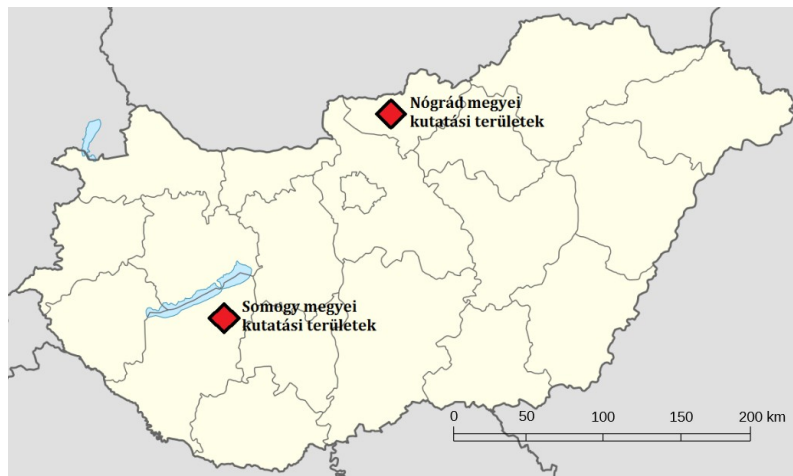


2. ábra. A hamis idősoros kísérlet alapjául szolgáló séma.

### 4.2. Talajminta-vételezés és minta-előkészítés

A 4.1. fejezetben leírtak szerint két régióban, Észak- és Délnyugat-Magyarország két erdészeti táján (Külső Somogy és Középső-Cserhát-vidék) tájanként 4 erdőrészeletről, illetve ahhoz közeli 4 mezőgazdasági területről/vadföldről összesen 192 ásványi-, és 40 szerves felhalmozódási szintet érintő mintát gyűjtöttünk, illetve további 84 mintát, 100 cm<sup>3</sup> térfogatú Vér-féle talajmintavevő

hengerekkel. A két régióban („Nógrád” és „Somogy”) végzett terepi mintavétellel (3. ábra<sup>9</sup>) nyert párhuzamos adatsor a következtetések jobb általánosíthatóságát szolgálta.



3. ábra. Kutatási helyszínek az ország két erdészeti táján.

A terepi mintavételezés első lépése a szerves- (O) és ásványi talajszieitek (A, E, B, C) elkülönítése volt. A szerves szieiteket (O) egyúttesen, a fás vegetációval borított mintaterületeken 30 · 30 cm-es keret segítségével gyűjtöttük helyszínenként ötös sorozatokban, majd 40 °C-os szárítást követően meghatároztuk a tömegüket. Ez magába foglalta a még bomlatlan avart, apró ágakat, illetve a lebontás különböző fokán álló szerves felhalmozódási szieite részeit is, amelyeket a nemzetközi nomenklátúra második helyen, vagy alsó indexbe írt (kis)betűkkel (l, f vagy h) a lebontottság foka szerint olykor tovább finomít. Ezt követően az általános megfeleltethetőség érdekében az egyes ásványi talajszieitek természetes határait figyelmen kívül hagyva, egységesen a 0–5 cm, 5–10 cm és 10–30 cm közötti mélységi szieitekből történt mintaanyag-gyűjtés. A mintaterületeket ötös, míg a kontrollterületeket hármas sorozatokban mintáztuk, azonosítható bolygatástól távolabb eső, tipikus (reprezentatív) helyeken. A vételezési pontok valamennyi esetben egymástól 3 m távolságban kerültek kijelölésre; öt ismétléses mintázás esetén a négy égtáj irányába és az így adódó merőlegesek metszéspontjában. A vizsgálatba vont helyszínek számának, a három mélységi szieiteből vett talajminták ismétlésszámának a projekt anyagi- és humán-kapacitásbeli keretei szabtak határt.

A minta-előkészítés az ISO 11464 szabvány szerint történt. Az ásványi szieitekből gyűjtött mintákat légszárzra szárítottuk (40 °C) majd átszítáltuk (< 2 mm), elválasztva a váztól és a gyökérdaraboktól is. A felületen adszorbeált nedvességet a fentiek szerint előkészített mintaanyagából, a légszárz és abszolút száraz állapot (105 °C-on tömegállandóság) közötti differenciából számítottuk. A térfogattömeg meghatározása valamennyi minta- és a „nógrádi” kontrollterületeken hármas sorozatokban gyűjtött minták alapján történt. (Sajnos a „somogyi”

<sup>9</sup> A térkép forrása (GNU Szabad Dokumentációs Licenc):

[https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/thumb/a/ac/Hungary\\_location\\_map.svg/1280px-Hungary\\_location\\_map.svg.png](https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/thumb/a/ac/Hungary_location_map.svg/1280px-Hungary_location_map.svg.png) (elérés: 2022. 09. 26.; szerkesztve)



kontrollterületek Vér-féle hengerrel való mintázása elmaradt). A mintaterületeken mindhárom vizsgált szintből külön-külön, míg kontrollterületeken a mélységre való tekintet nélkül gyűjtöttünk 100 cm<sup>3</sup>-es mennyiségeket (mivel ezek művelt mezőgazdasági területek voltak).

### **4.3. Laboratóriumi vizsgálatok**

#### **4.3.1. C, N referenciamérések, pH-meghatározás**

A disszertáció legfontosabb referenciaadatait szén, nitrogén relatív arányára vonatkozóan katalizált száraz égetéssel az ISO 10694 szabvány szerint, "Vario EL cube" készülékkel (Elementar Analysensysteme GmbH, Hanau, Németország) nyertük. A szervetlen szén részarányát (benne foglalva a szénsavas meszet) 5 órán át 550 °C-os izzítást követően valamennyi mintára kiterjedően szintén katalizált száraz égetéssel határoztuk meg (Bisutti et al., 2004). A pH-t „Tiamo” automatizált mérőeszközzel (Metrohm AG, Herisau, Svájc), 1:2,5 arányú talajszuszpenzióban 0,1 M-os kálium-klorid oldatban és desztillált vízben is meghatároztuk az ISO 10390 szabvány szerint.

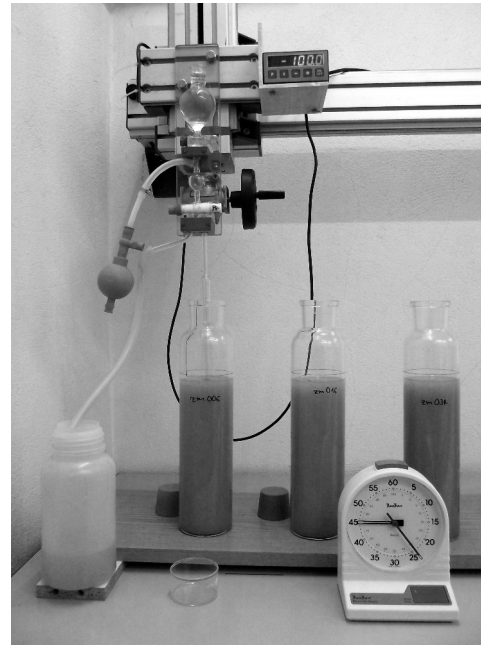
#### **4.3.2. Textúra-meghatározás**

A finom frakciók (agyag- és iszapfrakciók) vizsgálata összehasonlító-jelleggel két különböző módszerrel, míg a homokfrakciók elkülönítése egységesen nedves szitálással történt. Ennek megfelelően valamennyi mintavételi helyszín 3 mélységi szintjét hagyományos pipettás (Köhn) és elektro-hidrosztatikus (Pario® classic) eszközzel is megmértük (2 · 48 minta), illetve ezen túlmenően valamennyi termőhelyről hozzávettünk még egy további kontrollmintát is (vagyis összesen 2 · 64 minta textúraanalízisét végeztük el). A homokfrakciók elkülönítéséhez 0,630; 0,200 és 0,063 mm hézagú szitasort használtunk; itt az egyes frakciók tömegarányát a bepárlás után mért száraz tömegből számítottuk.

Minta-előkészítés: mindkét módszer esetében azonos módon történt. Az átszitált (< 2 mm), a bemérést megelőzően 24 órán át 40 °C-on szárított talajmintából a pipettás módszerhez kb. 10 g-os, míg a Pario® mérésekhez kb. 30 g-os mennyiségeket mértünk be, analitikai mérlegen. A cementálóanyagok eltávolításához meleg (80–90 °C-os) hidrogén-peroxidos roncsolást alkalmaztunk (30%-os H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>-vel) mindaddig, míg további reakció már nem volt látható (12–14 nap). A kémiai diszpergálás nátrium-pirofoszfáttal történt, amelyet oldat (25 ml 0,1 M Na<sub>4</sub>P<sub>2</sub>O<sub>7</sub>, a pipettás-módszer esetében) vagy só formájában (2 g Na<sub>4</sub>P<sub>2</sub>O<sub>7</sub>, a Pario® módszer esetében) adtunk a mintához. A szuszpenzió homogenizálása, illetve fizikai diszpergálása – alapos, de körültekintő módon – manuálisan történt annak érdekében, hogy elkerüljük a durva vagy túl hosszú rázatás okozta mechanikai energiabevitelt. Az így tartósan diszpergált mintaanyagot

desztillált vízzel pontosan 1000 cm<sup>3</sup>-re kiegészítve töltöttük át a szedimentációs hengerekbe; azt követően a mérések konstans hőmérsékletű helyiségben zajlottak, temperált szuszpenziókkal. A méréseket közvetlenül megelőző homogenizálás valamennyi esetben manuálisan, a ledugaszolt hengerek „fejen át fordításával” történt.

A Köhn-pipettás méréseket (4. ábra) az ISO 11277 szabvány alapján végeztük, amely során mintánként 4 textúra-csoport: a durva-, közép- és finom-iszap, illetve az agyag elkülönítése történt meg (ezek mérettartománya rendre: 0,02–0,063 mm; 0,0063–0,02 mm; 0,002–0,0063 mm; illetve < 0,002 mm). A mintavételezéshez egy 4 horizontális nyílással ellátott, precíz, vertikális manipulátorra erősített pipettát alkalmaztunk. Az egyes frakciók részarányát a – homokfrakciókéval egyező módon – 105 °C-os bepárlást, majd milligramm-pontosságú mérést követően számoltuk ki. Modellezésnél (részletek ld. 5.3. fejezet) egyazon mintához tartozó sorozatmérések esetében a mediánt használtuk, míg egy-egy csoporton belül a mért adatokat értelemszerűen kiterjesztettük az egybetartozó öt- illetve három mérési pont többi tagjára is. A mérések megbízhatóságát egy 4 mintára kiterjedő hármas sorozatméréssel teszteltük (összesen 12 független mérés).



4. ábra. A hagyományos textúraanalízisekhez használt Köhn-féle pipetta (saját felvétel).

A 64 Pario<sup>®</sup>-minta mérését (5. ábra) öt darab egyedi mérőeszközzel, alkalanként 12 órás időtartamban, legalább háromszoros (N=3–9) ismétléssel végeztük azonos körülmények között, újbóli homogenizálást követően. Az esetleges szisztematikus hibák elkerüléséhez ismételt méréseknél a mérőeszközt az ötből véletlenszerűen választottuk. (Három feletti mérés-ismétlésre egyazon minta esetében olyan esetekben került sor, ha a nyomásgörbe lefutása szokatlan volt.) A mérések bonyolításakor precízen követtük a készülék használati utasítását. Az adatok kiértékelése “Pario Control” szoftver 1.0.2.0-s verziójával történt.



5. ábra. A kutatásunkban használt Pario<sup>®</sup> készülékek (saját felvétel).

#### 4.3.3. Sűrűségkülönbség-alapú SOM-frakcionálás

A 0–5 cm és 5–10 cm-es szintekben ötszörös sorozatméréssel összesen 128 db talajmintát frakcionáltunk a Golchin és mtsai. (1994) által kidolgozott eljárással. Ehhez esetenként 25,00 g átszitált (< 2 mm), légszáras talajmintát nátrium-poliwolframát oldatban ( $3 \text{ Na}_2\text{WO}_4 \cdot 9 \text{ WO}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$ ,  $\rho = 1,6 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ ) kémiletes módon szuszpendáltunk, illetve a folyadékkal való fokozatos telítődéshez (az aggregátumok épségének megőrzése érdekében) a mintaanyagot kb. egy órán át állni hagytuk a frakcionáló oldatban. Első lépésként, centrifugálást követően az fLF szeparálása történt meg. Ezt követően az aggregátumok ultrahangos roncsolásával (6. ábra) újabb centrifugálást követően elkülönült az oLF. Az összesen  $400 \text{ J} \cdot \text{cm}^{-3}$  energiaközlést a mintaanyag melegedésének elkerülése érdekében szakaszosan, jeges vízfürdőben végeztük; az alkalmazott energiadózis pontosságát pedig az ultrahang-egység előzetes kalorimetrikus-alapú kalibrálásával biztosítottuk. A hátramaradó mintaanyag képezte HF-et. Az egyes frakciókat valamennyi esetben desztillált vízzel tisztítottuk meg a frakcionáló oldattól (7. ábra); a mosás megfelelőségét az elektromos vezetőképességen keresztül ellenőriztük. Valamennyi mintát a fagyasztva szárítást, tömegmérést és homogenizálást (megőrleést) követően kémiai analízisnek (katalizált száraz égetés) vetettünk alá, amely során meghatároztuk az egyes frakciók C és N arányát.



6. ábra. Sonics & Materials – Vibra-Cell VCX-750 ultrahang-egység a minták dezaggregához (saját felvétel).



7. ábra. Mintamosás vákuum-szűrőállványok segítségével (saját felvétel).

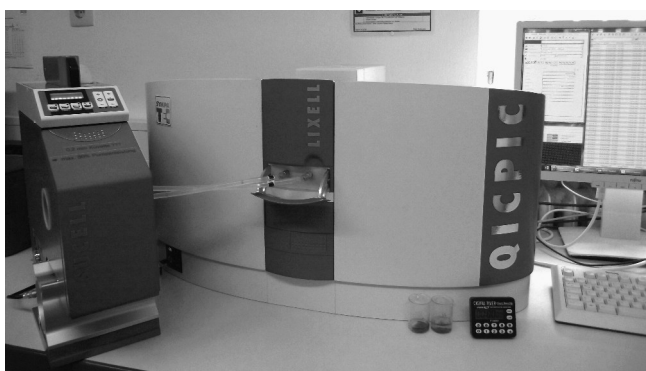
Az eljáráshoz használt laboreszközök:

- Thermo Scientific Heraeus Megafuge 40 centrifuga,  $3500 \text{ fordulat} \cdot \text{perc}^{-1}$ , 26 perc időtartam;
- Sartorius polikarbonát vákuum-szűrőállványok (típuszám: 16511), VWR 696 típusú  $1,5 \mu\text{m}$  hézagú üvegszál-alapú filterkorongokkal, valamint a működtetésükhöz Vacuubrand ME 2 NT membrán-vákuumpumpa;

- Sonics & Materials, Inc. – Vibra-Cell VCX 750 ultrahang-készülék 13 mm-es szondával. Bemerülési mélység 5 cm, amplitúdó 60%, összesen közölt energia:  $400 \text{ J} \cdot \text{cm}^{-3}$  (ehhez a kezelési időtartamot a mintatömeg alapján egyedileg számítottuk).
- Christ Alpha 1-4 LSCplus liofilizáló (fagyasztva-szárító) berendezés;
- Retsch MM2 rezgő porító-homogenizáló berendezés, 1 perc időtartamban 70 Hz-nél;
- Elementar Vario EL cube elemanalizátor;
- laboratóriumi mérleg.

#### 4.3.4. Digitális dinamikus képanalízis

A QicPic-et Lixell és Sucecell modulokkal kombinálva (8. ábra) a 3.4.3. pontban felvázolt összefüggések alapján az aggregált talajminták, az ultrahanggal kezelt minták, valamint elsődleges ásványi részecskék vizsgálatára használtuk. Célunk az egyes fajok befolyásának felderítése volt az aggregátumok méretére és morfológiájára. Az elsődleges talajrészecskék mérésére az aggregátumok jobb elkülöníthetősége érdekében került sor, a megoszlási diagramok grafikus egybevetésénél. A felvázolt feladatokhoz a készülékkel az ekvivalens átmérőt, a gyakoriság szerinti szemcseméret-megoszlást, a térfogat szerinti kumulatív megoszlást, valamint a gömbszerűséget (szfericitást) mértük vizes közegben.

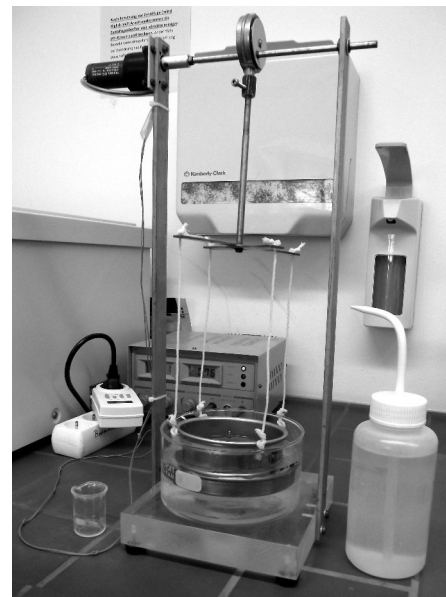


8. ábra. QicPic Lixell és Sucecell modulokkal, a dinamikus képanalízishez (saját felvétel).

Az aggregált minták (összesen 120 db; valamennyi termőhelyről, szintenként három, illetve kontrollterület esetében kettő) és az elsődleges talajrészecskék (16 minta; valamennyi termőhely 5–10 cm-es szintjéből egy) minta-előkészítése eltért. Az aggregált minták esetében Kayser 2014-es munkája és szóbeli útmutatása alapján az egy-egy méréshez elkülönített, kb. 0,8–1,5 g közötti reprezentatív mintamennyiséget lassú, kíméletes desztillált vizes megnedvesítés után 15–30 percre állni hagytuk a fokozatos telítődés érdekében. Ennek célja az „air slaking” vagyis a hirtelen telítődés következtében az aggregátum pórusaiban megnövekvő levegőnyomás hatására bekövetkező szétfeszítődés (szétrobbanás) elkerülése volt. Ezt követte a nedves szitálás (9. ábra), ahol a már szuszpendált mintát egy víztestben álló, kéttagú szitasorra (1000  $\mu\text{m}$ , 63  $\mu\text{m}$ ) mostuk, majd a 63  $\mu\text{m}$  hézagú szitát három perc vertikális alternáló mozgatásnak (percenként 35 emelkedés, kb. 2 cm út) tettük ki, így elkülönítve a 63–1000  $\mu\text{m}$

közötti frakciót. Szitálás közben a mintaanyag mindvégig a folyadéktestben maradt. A nedves szitálás oka: (1) a készülék mérési tartományához való igazodás, (2) a  $< 63 \mu\text{m}$  aggregátumok eltérő szétesési rátája az alkalmazott energiamentiségnél, valamint az a tény volt, hogy (3) a  $> 1000 \mu\text{m}$  szuszpendált aggregátumok növekvő mérettel egyre érzékenyebbek a mechanikai hatásokra, ezért nehezebb vizsgálni őket (Kayser et al., 2019; Kayser, szóbeli közlés). A fenti minta-előkészítést (majd a mérést) egyazon minta esetében annyiszor ismételtük (7–10 aliquottal, vagyis reprezentatív minta-részhányaddal), míg  $\gg 10^6$  db részecske detektálásra nem került; így biztosítva az  $< 5\%$  standard hibát (Kayser et al., 2019). Elsődleges talajrészecskék esetében a minta-előkészítés a textúraanalízisével azonos módon történt. A meleg (80–90 °C-os) hidrogén-peroxidos feltárást (30%  $\text{H}_2\text{O}_2$ ) addig folytattuk a mintákkal, míg reakció volt látható; majd a mintaanyagot nátrium-pirofoszfáttal (25 ml 0,1 M  $\text{Na}_4\text{P}_2\text{O}_7$ ) és kíméletes kézi rázással tartósan diszpergáltuk.

A méréseket megelőzően a kép élesre állításához („autófókusz”) referencia-kvarchomokot használtunk. Ügyelve az  $< 1,5\%$  képtelítettségre, (amely felett magasabb a szemcsék átfedésének valószínűsége) a mintákat valamennyi esetben vizes szuszpenzió formájában juttattuk a mérőküvetét magába foglaló Lixell-modulba. Az ezzel körpályás összeköttetésben álló Sucell nedves diszpergáló modulon 40%-os pumpálási- és 40%-os keverési intenzitást alkalmazva igyekeztünk minimalizálni mindennemű mechanikai hatást. Aggregált minták esetében a fentebb már említett egyazon mintához tartozó több, rövid időtartamú (20 s) mérés ugyanezt a célt szolgálta. Ezzel szemben az elsődleges talajrészecskék mérését kevesebbszer, de alkalmanként hosszabb ideig (180 s) végeztük, ugyanis ezek lényegesen ellenállóbbak a mechanikai hatásokkal szemben. Az egyes méréseket követően desztillált vízzel mostuk át a rendszert a vizsgálaton túlesett szemcsék eltávolításához; ezt a műveletet addig folytattuk, míg a képtelítettség  $< 0,01\%$  nem lett. Az alkalmazott 1,0 mm-es mérőküvetta és M6-os objektív az 5–1705  $\mu\text{m}$  közötti elméleti mérettartományban, 450 kép/s felvételi sebességgel, 1% alatti hibával (ISO 14488) tette lehetővé a vizsgálatot. Az aggregátumstabilitás vizsgálatához a Sucell modulba épített (60 W névleges összteljesítményű) ultrahang-egységet vetettük be két lépcsőben, alkalmanként 10 s hosszan, 10%-os teljesítmény mellett. Ez megközelítőleg  $10 \cdot 6 \text{ W}/400 \text{ ml}$ , vagyis  $\sim 0,15 \text{ J} \cdot \text{cm}^{-3}$  roncsolási energiát jelentett egy-egy menetben. Az energiaközlést követően azonnal indítottuk a mérést.



9. ábra. Aggregátumok desztillált vizes telítését követő frakcionálása nedves szitálással (saját felvétel).

Az automatikus képanalízis-vizsgálatok nyers adatainak első szintű kiértékelését a készülék saját szoftverével (Windox 5, verzió: 5.8.2.1) végeztük; a szemcsék 34 azonos méretátfogású csoportba lettek sorolva a  $Feret_{min}$  szerint. Az egyazon mintához tartozó mérések adatbázisait összevontuk. A tényleges kiértékelés a 15–1100  $\mu\text{m}$  közötti mérettartományban (primer szemcsék esetében nem rögzítettünk alsó határt), illetve  $S = 0,95$ -nél alacsonyabb szfericitású részecskék körében történt. Ilyen módon igyekeztünk elkerülni, hogy a nedves szitálással „előszortírozott” aggregátumok tipikus mérettartományánál lényegesen kisebb vagy nagyobb-, illetve a túlságosan gömbszerű ( $\rightarrow$ légbuborék) objektumok mint potenciális hibaforrás torzíthassák az eredményeket. Megjegyzendő, hogy az alkalmazott mérőeszköz a fentebb leírt optikai rendszerrel nagyjából a finom iszap mérettartománnyal bezárólag ( $> 6,3 \mu\text{m}$ ) volt képes szemcsék detektálására, vagyis az elsődleges talajrészecskék méretspektrumának csak egy részét fedte le. Így az általunk vizsgált 63 és 1000  $\mu\text{m}$  közötti mérettartományon kívül a minerális szemcsék és mikroaggregátumok közötti különbségtétel nem volt lehetséges. A szétesési ráta meghatározásához az egyes kvantilisoknál tapasztalt méretváltozásokat ( $\Delta D_x$ ) értelem szerűen az egyes „kezelési fokozatokhoz” tartozó adatsorok (kezeletlen=aggregált; 1. ultrahang-kezelés (US1); 2. ultrahang-kezelés (US2)) különbségéből határoztuk meg ( $\Delta 1 = \text{US1-Aggregált}$ ;  $\Delta 2 = \text{US2-US1}$ ).

#### 4.3.5. Statisztikai értékelés

A disszertációban tárgyalt adatok és mérési eredmények értékelését az R, illetve R-Studio statisztikai platformmal végeztük, verzió: 4.1.2 (R Core Team, 2021; RStudio Team, 2021). Az ábrák készítéséhez ezt kiegészítve a „ggplot2” csomagot (Wickham, 2016), a tesztekhez a „stats”, az „rstatix” és a „tidyverse” (Kassambara, 2021; Wickham et al., 2019), míg a modellezéshez az „lme4” és a „caret” csomagokat használtuk (Bates et al., 2015; Kuhn, 2021). Regresszióanalíziseknél a multikollinearitás (szorosan összefüggő változók) kizárására a „performance” csomagot (Lüdecke et al., 2021), míg a reziduálisok normalitástesztjéhez a „DHARMA” csomagot (Hartig, 2022) használtuk. Egyszerűbb számítások néhány esetben Microsoft® Excel (Microsoft® Office Professional Plus 2010) programmal történtek. A dolgozatban használt konfidenciaszint:  $(1-\alpha)=0,95$ .

A nyers adatok normalitásvizsgálatát Shapiro-Wilk teszttel végeztük, amely szinte kivétel nélkül a normálistól eltérő eloszlásokat mutatott. Az általános termőhelyi paraméterek valamely változó mentén történő összehasonlításához („általános szignifikancia-teszt”) Kruskal-Wallis-probát (H-teszt) alkalmaztunk, amely esetében nem kritérium, hogy a bementi paraméterek (mért változók) normál eloszlásúak legyenek (Kassambara, 2021). Ez a teszt az egytényezős varianciaanalízis (one-way ANOVA) nem-parametrikus alternatívája (Welch, 1951). A próba

statisztikai hatásmagyságának vizsgálatához, illetve a nullhipotézis igazolására (vagyis hogy az összehasonlított csoportok között nincs sztochasztikus dominancia) az alábbi teszt-statisztikával (H-statisztika) meghatároztuk az  $\eta^2[H]$ -értéket (Tomczak & Tomczak, 2014):

$$\eta^2[H] = \frac{H - k + 1}{n - k} \quad (6)$$

ahol  $\eta^2[H]$  a Kruskal-Wallis hipotézisteszt eredménye;  $k$  a csoportok száma; valamint  $n$  a mintaszám (mérések száma). Az eredmény 0,01–0,06 között gyenge hatásra, 0,06–0,14 között közepes hatásra, valamint  $\geq 0,14$  esetén erős hatásra utal.

A H-teszt után a csoportok közötti szignifikáns különbségek felfedésére következő lépésben („post-hoc”) páros tesztek végeztünk, és a p-értékeket a Bonferroni-módszerrel módosítottuk (Dunn, 1964). A szignifikanciaszintet az alábbiak szerint egységesen, csillaggal jelöltük a dolgozatban (1. táblázat).

Jelölés	A p-érték nagysága	
	normálalakban	tizedes alakban
	$p > 5E-2$	$p > 0,05$
*	$p \leq 5E-2$	$p \leq 0,05$
**	$p \leq 1E-2$	$p \leq 0,01$
***	$p \leq 1E-3$	$p \leq 0,001$
****	$p \leq 1E-4$	$p \leq 0,0001$

1. táblázat. A dolgozatban használt szignifikanciaszintek jelölései.

Az egyes termőhelyi paraméterek páros tesztjeit tehát a mintavételi helyek (a kutatási séma szerinti értelmezésben: fafaj-generáció, illetve kontrollterületek) jelentette csoportok mentén végeztük. Az irreleváns (értelmetlen) szignifikancia-összefüggéseket (pl. akác 1. generációs kontrollterület versus tölgy n. generációs termőhely stb.) nem vizsgáltuk.

A sűrűségkülönbség-alapú SOM frakcionálás adatainak normalitásvizsgálatához (régióként és szintenként) szintén a Shapiro-Wilk tesztet használtuk, amely azt mutatta, hogy az adathalmaz nem normál eloszlású. Ezért a három elkülönített frakció (fLF, oLF, HF) közötti szignifikáns eltéréseket páronként (az előzőekhez hasonlóan a mintavételi helyek szerint) Wilcoxon-Mann-Whitney próbával (U-teszt) vizsgáltuk, amely teszt a kétmintás t-próba nem parametrikus megfelelője.

A termőhelyi (tágabb értelemben ökológiai) faktorok befolyását a talaj szénkészletére lineáris kevert-hatás modellek („linear mixed-effects models”, röviden LMM-ek) segítségével vizsgáltuk,

amelyek elnevezésében a „mixed-effects” arra utal, hogy ezen lineáris modellek a célváltozók (függő változók) képzéséhez egyaránt felhasználnak rögzített- és véletlen effektusokat. Részben a hamis idősoros kutatási koncepcióból következik, hogy az adathalmazunk „nested random effects” struktúrájú, vagyis valamennyi paraméterre befolyással bír a helyszín. A két régiót, illetve azokon belül az egyes mintavételi helyszíneket (azaz gyakorlatilag a csoportok közötti varianciát) mint véletlen effektuspárt („random effects”) valamennyi modellből kizártuk. A kutatásban érdeemben tanulmányozni kívánt prediktortok (tehát a termőhelyi/ökológiai faktorok) képezték a rögzített effektusok („fixed effects”) csoportját. Parametrikus regresszióanalíziseknél egy (lineáris) prediktor alatt regressziós-koefficiensek és magyarázó változók sorainak lineáris kombinációját értjük, amelyek becslő értéke (predikciója) a célváltozó képzéséhez felhasználásra kerül, ezáltal a lineáris regressziós-modellek legalapvetőbb összetevői közé tartoznak<sup>10</sup>. Az LMM-ek alkalmazhatóságának legfőbb feltétele, hogy a reziduálisok megközelítőleg normál eloszlásúak legyenek; ezt „quantile-quantile plot”-ok segítségével minden esetben vizsgáltuk. Ezen túlmenően a változók egymással való korrelációjának kizárására a prediktorokat teszteltük multikollinearitásra.

Az LMM-ek megbízhatóságának még megalapozottabb igazolására kereszt-validációt („k-fold Cross-Validation”; k=10) végeztünk, amelyhez az adatpopulációt 1 : 8 arányban megosztottuk: 7/8-ad részt az adott modell „élesztésére”, míg 1/8-ad részt érvényesítésre (ellenőrzés) használtunk. Fontos megemlíteni, hogy a kevert hatás modellek által leszűrt megállapítások, tendenciák csak megszorításokkal általánosíthatóak/terjeszthetőek ki nagyobb léptékekben, amely ezeknek az alapvető tulajdonságaiból következik. Esetünkben a széntárolásra vonatkozó megállapításokat leginkább hasonló termőhelyi- és éghajlati viszonyok mellett általánosíthatjuk.

Az automatikus képanalízis-vizsgálatok nyers adatainak első szintű kiértékelése nyomán a Windox 5 szoftverrel képzett output mutatókat/paramétereket (mérési eredmények) a szakirodalmi áttekintés 3.4.3. pontjában tárgyaltuk. Az egyes fajok hatásának kimutatásához, illetve az aggregátumstabilitás-vizsgálatoknál egyes csoportokon belül a szemcseméret-adatok szórásának összehasonlításához a szórással ( $\sigma$ ) és a számtani középpel ( $\bar{x}$ ) az alábbi összefüggés szerint variációs együtthatót ( $CV$ ) számítottunk (Jenne, 2020):

$$CV = \frac{\sigma}{\bar{x}} \quad (7)$$

Ezt a hányadost egy-egy régióon belül az összes mintaterületre kiterjesztve az alábbi képlettel kiszámítottuk a csoportok közötti variációs együtthatót ( $CV_{össz}$ ) is:

$$CV_{össz} = \frac{CV_{csoport}}{CV_{régió}} \quad (8)$$

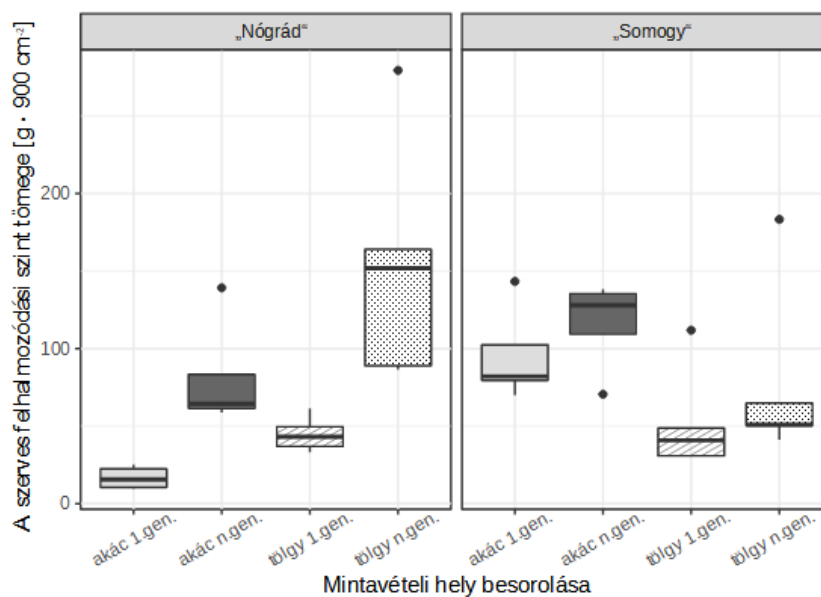
<sup>10</sup> Forrás: [https://de.wikipedia.org/wiki/Linearer\\_Pr%C3%A4diktorkoeffizient](https://de.wikipedia.org/wiki/Linearer_Pr%C3%A4diktorkoeffizient) (elérés: 2022. 09. 26.)



## 5. Eredmények és következtetések

### 5.1. Általános termőhelyi paraméterek

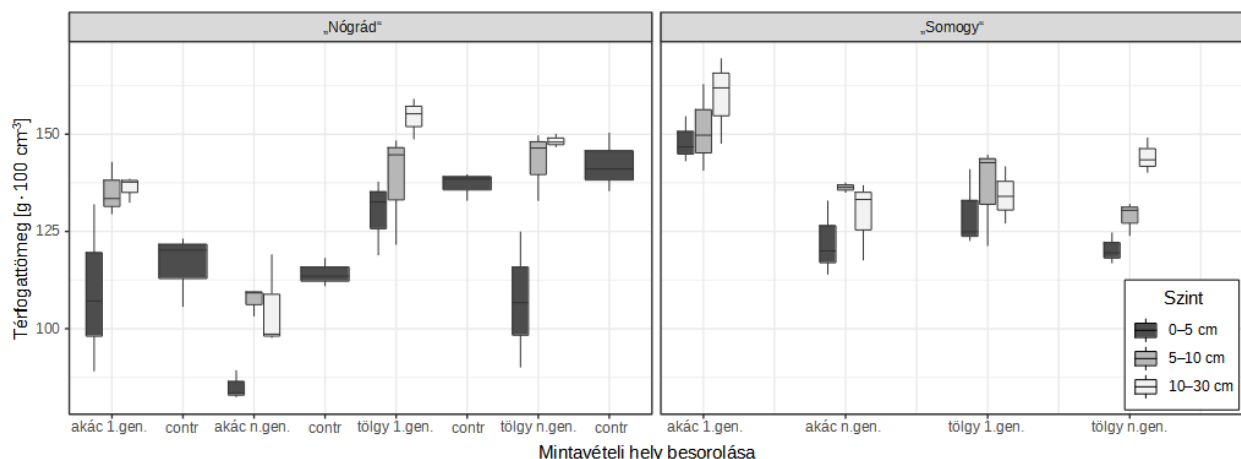
A szerves felhalmozódási szint fejlettsége („mennyisége”) és a talaj térfogattömege meglehetősen változékony paraméterek, illetve pillanatfelvétel formájában kevés információval bírnak, hiszen ezeket számos, a kutatásban nem vizsgált tényező (pl. a gazdálkodási forma, az állomány kora és egészségi állapota, a talajfauna-aktivitás, évszak stb.) jelentősen befolyásolja. Ennek ellenére a felvételkor mindkét régióban több elhalt szerves anyag (elnagyoltan avar) halmozódott fel a többedik generációs mintaterületeken, mint az adott fafajhoz tartozó első generációsokén (10. ábra). Szignifikáns eltérés a „nógrádi” akácospárosánál mutatkozott, illetve ugyanebben a régióban az 1. generációs akác és n. generációs tölgyes között. (Valamennyi páros szignifikanciateszt, illetve azok összefoglaló adatai megtalálhatóak a Függelék F4. a-b. táblázatában.)



10. ábra. A felhalmozódási szint 30 · 30 cm-es felületről gyűjtött mintáinak (N=5) tömege 40 °C-os szárítást követően, a két régióban.

Az első generációs állományok alatt rendre magasabb térfogattömeg-értékeket mértünk mint az azonos fajú többedik generációs állományok esetében (11. ábra), kivétel a „somogyi” tölgy-páros 10–30 cm-es szintje, illetve a „nógrádi” tölgy-páros 5–10 cm-es szintje volt, ahol a többedik generációs állományok esetében csekély mértékben, de magasabb térfogattömeget tapasztaltunk. Mindez alátámasztja a többedik generációs állományoknál látható nagyobb szervesanyag-felhalmozódást. Ez leginkább azzal magyarázható, hogy a nagy szervesanyag-tartalom (1) a szerves anyag kis sűrűsége miatt térfogattömeg-csökkentő hatású, valamint (2) a magasabb szervesanyag-tartalom elősegíti szerkezetképződést, vagyis a jobban

aggregálódott talajok kevésbé tömörödnek, és kisebb lesz a térfogattömegük. Valamennyi „nógrádi” kontrollterület mezőgazdasági művelés alatt állt (sajnos csak ezekről állnak rendelkezésre térfogattömeg adatok); azok egyöntetűbb, a mintaterületekéhez hasonló értékeket mutattak. Esetükben a talajművelés hatására valószínűleg leromlott a szerkezet, így a kontrollterületek (feltalajból vett) mintáinak térfogattömege rendre nagyobb volt, mint az erdőterületek feltalajának térfogattömege. A mélyebb talajrétegekben, (csökkenő szervesanyag-tartalom mellett) többnyire az erdőállományok alatt is nőtt a térfogattömeg, ami a mélységgel csökkenő szerkezetességre (gyengébb aggregálódottságra) valamint nagyobb tömörödési hajlamra is utalhat. Az n. generációs akácok-, illetve a „somogyi” 1. generációs tölgyes alatt ugyanakkor javuló szerkezet (alacsonyabb térfogattömeg-érték) mutatkozott a 10–30 cm-es mélységben. A „nógrádi” régióban szignifikáns eltérés az akác n. generációs – tölgy 1. generációs termőhelyek-, illetve az akác n. generációs – tölgy n. generációs termőhelyek térfogattömege között mutatkozott. A „somogyi” régióban ugyanezre a paraméterre szignifikáns volt az eltérés az akác-páros esetében, az akác 1. generációs – tölgy 1. generációs termőhelyek, illetve az akác 1. generációs – tölgy n. generációs termőhelyek között is.



11. ábra. A térfogattömeg alakulása két régió minta- és kontrollterületein a három vizsgált ásványi szintben; 100 cm<sup>3</sup> térfogatú minták (N=3) 105 °C-os szárítása és tömegmérése alapján.

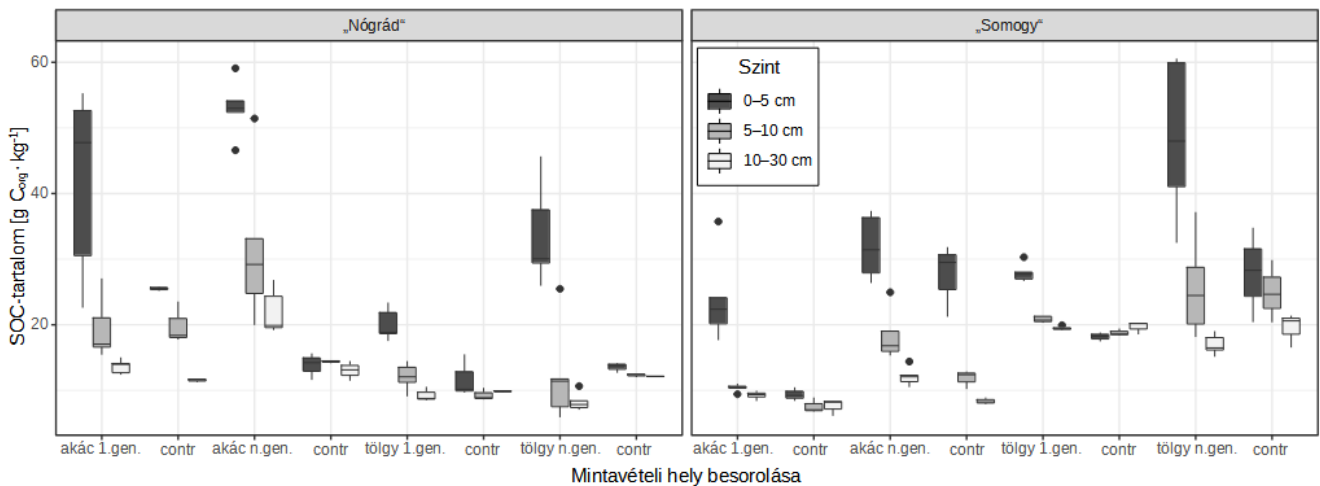
## 5.2. Készletadatok

A disszertációban tárgyalt (teljes) mintapopuláció főbb paramétereinek összefoglalása a 2. táblázatban látható (minimum, medián, átlag, maximum és szórás adatokkal). A koncentráció- és pH-adatok a 0–30 cm-es szintre összesítve vonatkoznak. A táblázat három utolsó oszlopa a Köhn-féle pipettás módszer mérési eredményeit mutatja. A legfontosabb alapadatok a Függelék F3. táblázatában találhatóak.

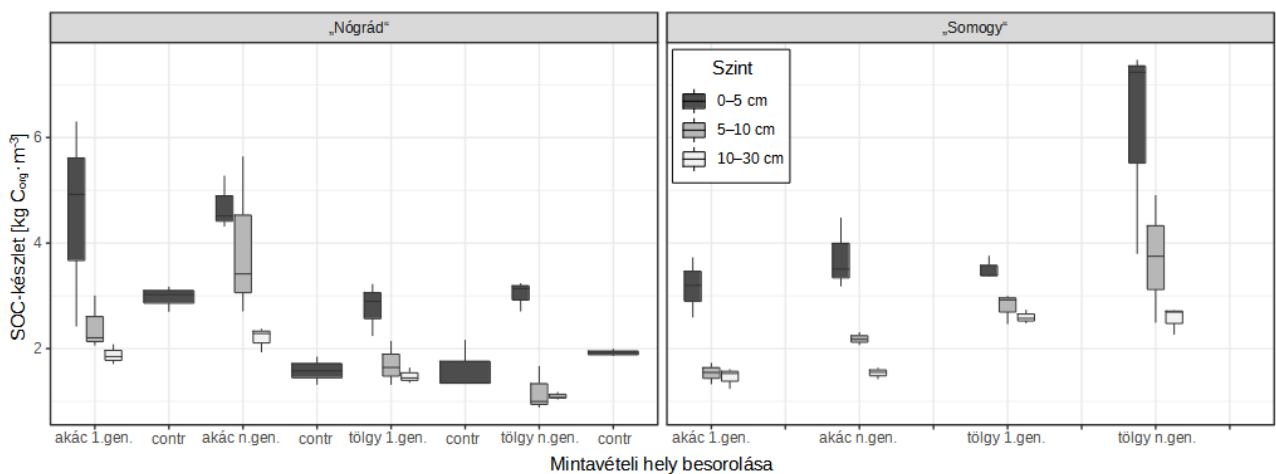
	SOC [g · kg <sup>-1</sup> ]	C <sub>anorg</sub> [g · kg <sup>-1</sup> ]	N <sub>total</sub> [g · kg <sup>-1</sup> ]	pH <sub>H2O</sub>	pH <sub>KCl</sub>	Agyag % [m/m]	Izlap % [m/m]	Homok % [m/m]
min.	5,91	0,14	0,76	4,9	3,5	16,95	27,17	3,67
$\tilde{x}$	17,59	0,26	2,04	6,1	4,9	28,31	47,02	20,31
$\bar{x}$	19,89	1,20	2,14	6,9	6,1	29,10	47,70	23,20
max.	60,56	12,08	6,25	8,1	7,3	47,62	67,33	47,62
$\sigma$	11,69	2,42	1,05	0,97	1,19	7,77	11,59	11,88

2. táblázat. A fontosabb termőhelyi paraméterek áttekintése.

A két régióban az egyes mintavételi helyeket egybevetve (12. és 13. ábra) a szerves szén mennyiségében szignifikáns eltérést tapasztaltunk a „nógrádi” n. generációs akácok és kontrollterülete között, illetve ugyanezt az 1. generációs tölgyessel egybevetve. Továbbá e paramétert tekintve az n. generációs akácok szintén szignifikánsan különbözött az n. generációs tölgyestől. A „somogyi” régióban csak az 1. generációs akácok és n. generációs tölgyes alatt mért szén mennyisége között volt szignifikáns a különbség.

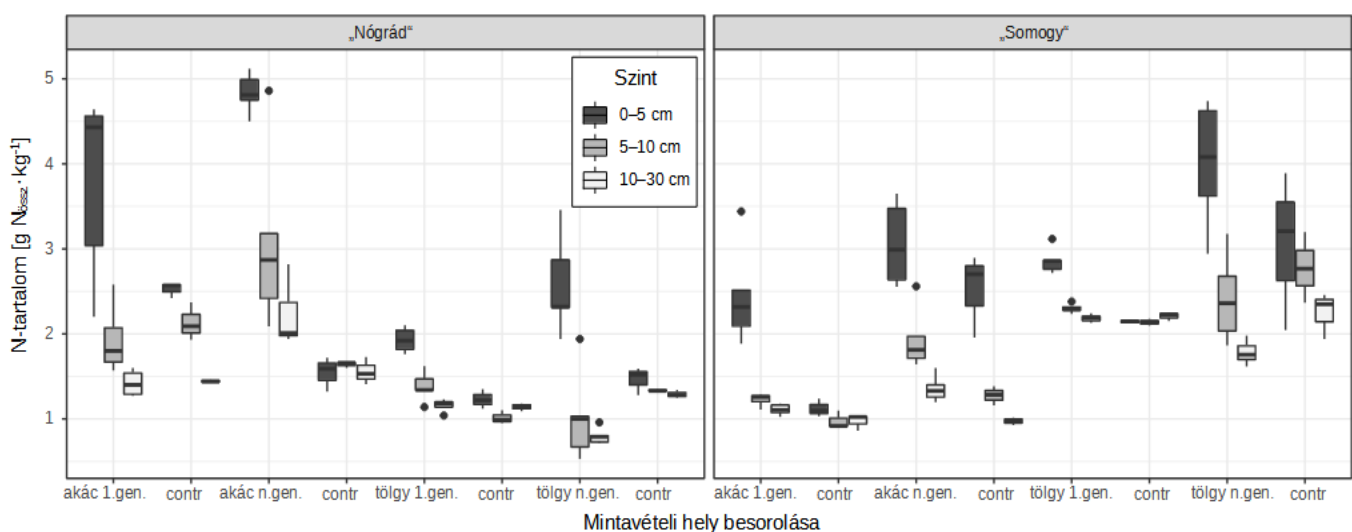


12. ábra. A talaj szerves széntartalmának tömegarányos alakulása a két régió minta- és kontrollterületein a három vizsgált ásványi szintben (N=5 a mintaterületek, illetve N=3 kontrollterületek esetében).

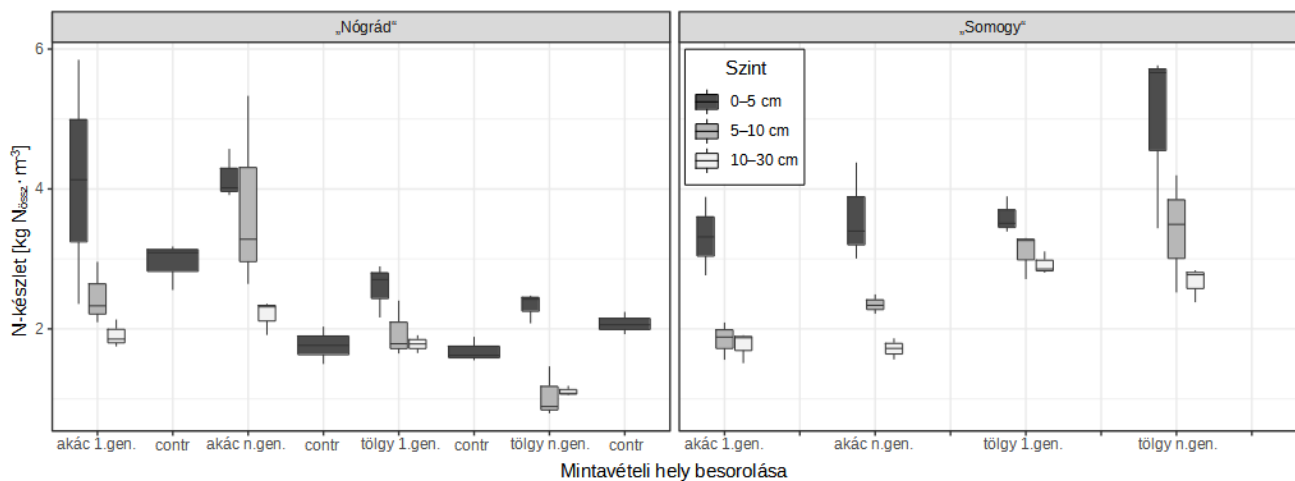


13. ábra. A talaj szerves szénkészletének alakulása a két régió minta- és kontrollterületein a három vizsgált ásványi szintben (N=5 a mintaterületek, illetve N=3 kontrollterületek esetében).

Az össz-nitrogéntartalom (14. és 15. ábra) tekintetében a „nógrádi” régióban az akác n. generációs termőhelyek szignifikánsan különböztek az első, illetve az n. generációs tölgyes termőhelyektől is. Ugyanezen paraméter vonatkozásában a „somogyi” régióban csak az 1. generációs akác és tölgy termőhelyek között mutatkozott különbség. Mindezek a két fafaj egyértelmű befolyását támasztják alá a talaj szerves szén,- és össz-nitrogénkészlete tekintetében: míg az 1. generációs állományok és kontrollterületeik közötti eltérések egyik esetben sem voltak szignifikánsak, az n. generációs faállományok jelentős befolyással voltak a szén és az össz-nitrogén mennyiségre, az 1. generációs állományokkal egybevetve. Az erdővel borított területek esetében a legszembetűnőbb mennyiségi különbségek a felső (0–5 cm-es) talajsztintben adódtak: mind szén, mind nitrogén esetében magasabb koncentrációkat mértünk a többedik, mint az első generációs állományok alatt. Mélyebb szinteket (5–10 és 10–30 cm) vizsgálva, többedik generációs akác állományok alatt rendre nagyobb szén- és nitrogén készletek adódtak az első generációsénál. Ezzel szemben a tölgyesek 5–10 és 10–30 cm-es szintjeiben megközelítőleg azonos széntartalmakat mértünk (illetve a somogyi tölgy páros esetében csökkenő tendencia mutatkozott); habár az össz-nitrogén mennyisége ugyanezen szintekben inkább alacsonyabb volt tölgy alatt. A jelenség hátterében a két fafaj elérő gyökérszettípusa (az aktív zónák térbeli eltérése), illetve az akác nitrogén-fixációja állhat: míg az akác gyökerei leginkább a felszín közelében futnak, a tölgy karógyökere mélyre hatol. Összességében valamennyi n. generációs állománynál igazolható a szervesanyag-felhalmozódás a legfelső rétegben, illetve akácoknál az alsóbb rétegekben is. A kontrollterületek a hozzájuk tartozó mintaterületekéhez hasonló készlet-mintázatot mutattak az egyes szintekben, egymáshoz hasonlítva viszont különböztek (értsd: eltérő volt a kiindulási állapot); ez nehézkessé teszi készletadataik összehasonlítását.



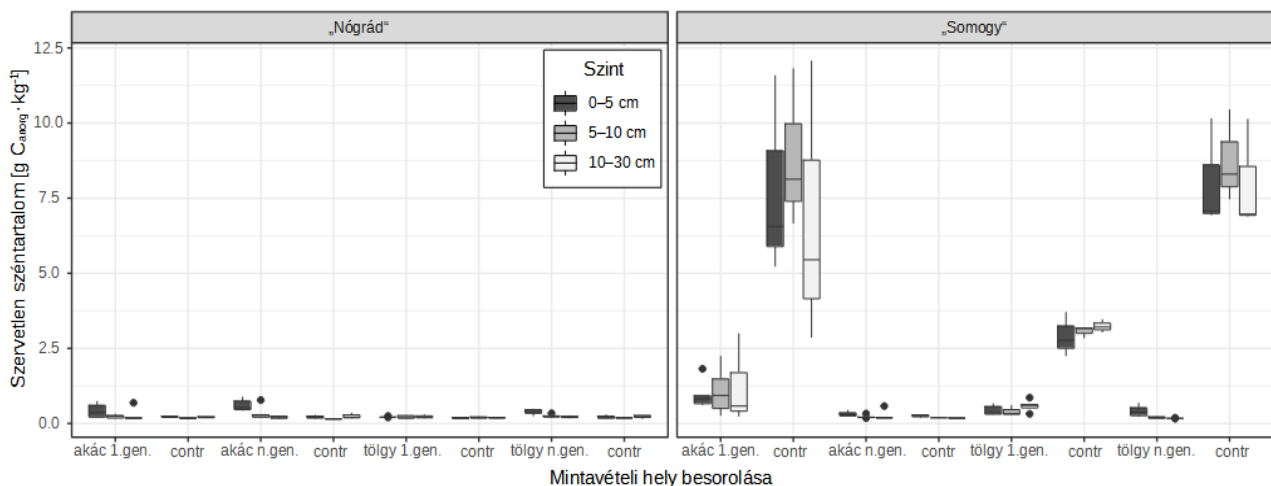
14. ábra. A talaj nitrogéntartalmának tömegarányos alakulása a két régió minta- és kontrollterületein a három vizsgált ásványi szintben (N=5 a mintaterületek, illetve N=3 kontrollterületek esetében).



15. ábra. A talaj nitrogénkészletének alakulása a két régió minta- és kontrollterületein a három vizsgált ásványi szintben (N=5 a mintaterületek, illetve N=3 kontrollterületek esetében).

### 5.3. Szervetlen széntartalom

A szervetlen széntartalom vizsgálatát alapvetően a kutatás fókuszában álló szerves széntartalom megismeréséhez végeztük el; ugyanakkor szükség volt rá a textúraanalízishez is. A szervetlen szén a legtöbb helyszín esetében alacsony részarányban volt jelen, viszont a "somogyi" kontrollterületek (konkrétan az 1. generációs akácos- és a két tölgyes kontrollterülete) kiugró értékeket produkáltak. Sajnos az okok nem ismertek; a mért értékek legkézenfekvőbb magyarázata az, hogy a szóban forgó somogytúri és koppányszántói mezőgazdasági területet, illetve a balatonszemesi vadföldet bázikus (mű)trágyákkal vagy gyomirtó szerekkel kezelhették a mintavételt megelőzően.

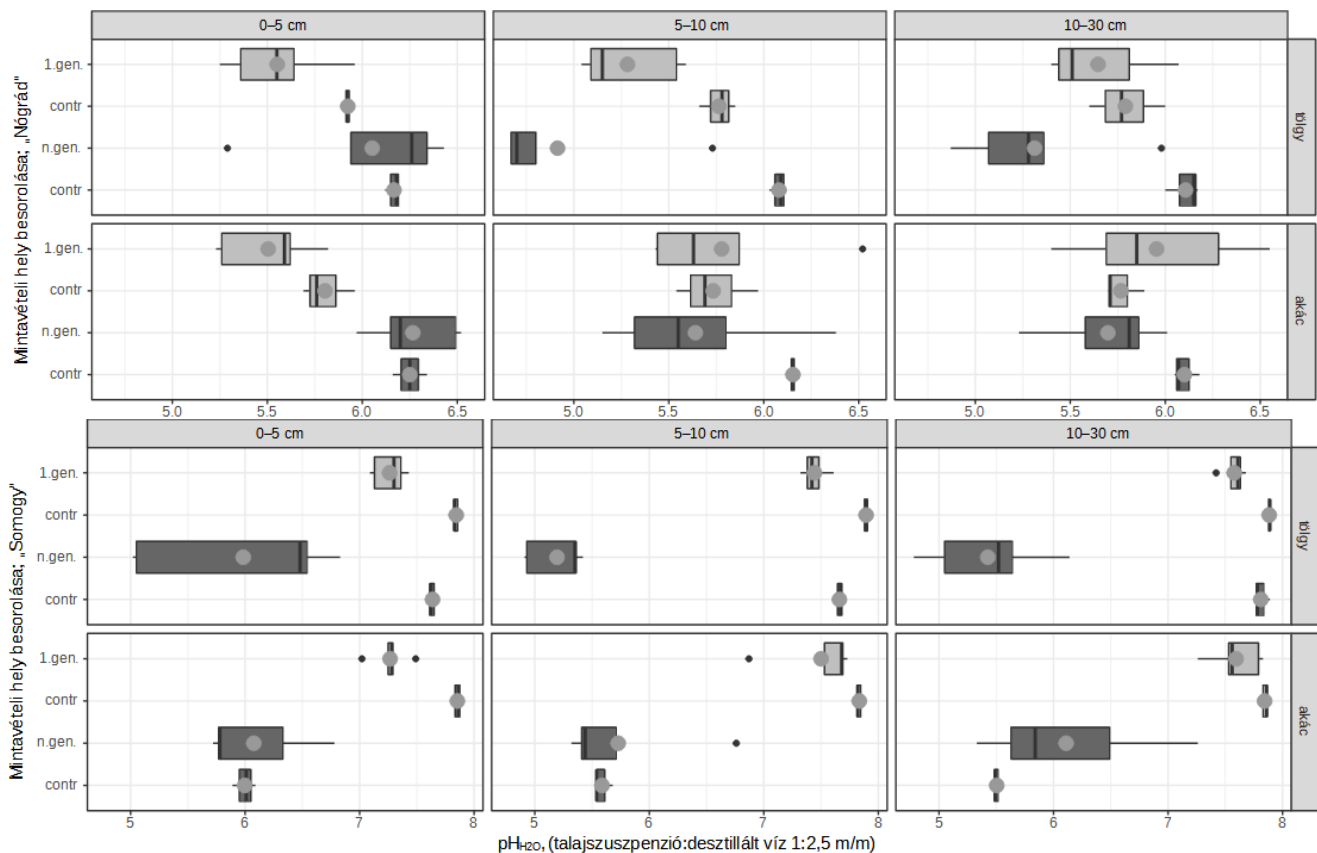


16. ábra. A talaj szervetlen széntartalmának alakulása a két régió minta- és kontrollterületein a három vizsgált ásványi szintben, 550 °C-os izzítást követően (N=5 a mintaterületek, illetve N=3 kontrollterületek esetében).

### 5.4. A kémhatás

A talaj kémhatása a két régióban eltérő tartományokba esett (17. ábra). A „nógrádi” régióban valamennyi minta- és kontrollterület pH-ja savanyú volt. A „somogyi” területeken az első generációs állományok és kontrollterületeik talaja enyhén bázikus, míg a többedik generációsok

talaja savas kémhatású volt. Az ezekhez tartozó kontrollterület a tölgyes esetében bázikus, míg az akácos esetében szintén savanyú volt. Valamennyi fafajt és helyszínt tekintve a kontrollterületekhez képest egy általános eltolódás látható a savanyú irányba a mintaterületeken (kivétel: a "somogyi" n. generációs tölgyes és kontrollterülete, illetve a „nógrádi” 1. generációs akácos és kontrollterületének mélyebb szintjei). A desztillált vizes pH-adatokat tekintve „Nógrádban” csak az n. generációs tölgyes és kontrollterülete között tapasztaltunk szignifikáns eltérést. A „somogyi” helyszínek esetében ugyanakkor szignifikáns különbségek adódtak az akác 1. és n. generációs-, a tölgy 1. és n. generációs-, illetve a tölgy n. generációs termőhely és kontrollterülete között is. Mindez a felső szintekben kifejezettebb kilúgzási folyamatokkal, illetve részben épp a mintaterületeken álló faállományok jelenlétével magyarázható: mindkét fafajra jellemző a termőhely-savanyító hatás. „Somogyban” a kontrollterületek kémhatásai több esetben szignifikánsan különböztek egymástól. Az 1. és n. generációs akácos kontrollterületek szignifikánsan eltértek egymástól, ugyanakkor az n. generációs akácos kontrollterülete szignifikánsan eltért az 1. és n. generációs tölgyesek kontrollterületeitől is. Ez azt mutatja, hogy „Somogyban” az n. generációs akácos kontrollterület alapvetően eltért a másik három kontrollterülettől, amely egybevégt a szervesetlen szénttartalomban ugyanezen három helyszín esetében megmutatkozó kiugrásokkal.



17. ábra. Az 1:2,5 arányú desztillált vizes szuszpenzióban mért talaj-pH alakulása a "nógrádi" (felül) és "somogyi" (alul) mintaterületeken, illetve kontrollterületeken a három vizsgált ásványi szintben. A világos boxok az 1., a sötétek az n. generációs állományokra vonatkozó értéket mutatnak (N=5 a mintaterületek, illetve N=3 kontrollterületek esetében).

## 5.5. A textúra

A textúra egy-egy termőhelyen belül a három vizsgált szint vonatkozásában meglehetősen egységes képet, míg a termőhelyek között kifejezettebb eltérést mutatott. Valamennyi helyszínt és kontrollterületet tekintve a vizsgált talajok a vályogok közé sorolhatóak; a „nógrádi” helyszíneken a három frakció megközelítőleg kiegyenlítetten volt reprezentálva, míg a „somogyiakon” az iszap valamelyest nagyobb részaránya volt látható. A grafikus ábrázoláshoz német textúraháromszöget (Sponagel et al., 2005: Bodenkundliche Kartieranleitung 5. kiadás, „KA-5”) használtunk (18. ábra), amely jól megfeleltethető a hazánkban is általánosan használt USDA-diagramnak (USDA Handbook 18. kiadás, 2017), viszont annál finomabb osztályozást tesz lehetővé. A minta- és kontrollterületek textúrakategóriáit (német- és USDA-besorolással egyaránt) a 3. táblázat szemlélteti.

A primer-szemcsemegoszlás (textúra) vizsgálatára a finom frakciókban – az Anyag és módszer fejezet 4.3.2. pontjában ismertetett módon, összehasonlító-jelleggel – két különböző működési elvű, ugyanakkor azonos fizikai jelenséget (lamináris ülepedés vizes szuszpenzióban) vizsgáló eszközt használtunk. Az újabb fejlesztésű Pario<sup>®</sup> készülék, illetve a széles körben referenciaként elfogadott Köhn-pipettás eljárás mérési eredményei (18. ábra) között – a közép iszap frakciót leszámítva – jelentős eltérések adódtak. A vizsgálatok reprodukálhatóságát tesztelve szintén bebizonyosodott, hogy a Pario<sup>®</sup>-val végzett mérések a pipettás eljárásénál alacsonyabb precizitásúak. Az eltérések okait vizsgálva, először a mérések kapcsán néhány esetben fellépő gyakorlati- és műszaki-jellegű problémákat, illetve potenciális hibalehetőségeket vettük végig, nevezetesen:

- az abnormális lefutású („lépcsőt” tartalmazó, vagy emelkedő) nyomásgörbék befolyását;
- az ismételt mérések között eltelt idő befolyását (ugyanannak a szuszpenzióknak az ismételt felrázásával végzett ismétlés);
- az öt egyedi mérőeszköz szolgáltatja eredmények közötti eltéréseket;
- a mérések közben fellépő (csekély) hőmérsékleti ingadozást.

Ezek befolyása nem volt szignifikáns, ugyanakkor az öt mérőeszköz eredményeinek mediánja között 5% [m/m] differencia adódott. Szintén nem volt lehetséges a fentebb pontokba szedett jelenségekkel megmagyarázni a két eljárás eredményei közötti eltéréseket. Mivel mindkét mérési módszer a Stokes-törvényen alapszik, a szemcsék alakja (kvázi a „detektálás” eltérő módja) sem lehetett az okok között. Ezért feltételeztük, hogy szisztematikus mérési hibáról kell szó legyen. Ezt követően egyszerű lineáris regresszióval valamennyi frakció mérési eredményeit

egybevetettük az eltérések mibenlétének feltárásához, amely a Pario<sup>®</sup> mérések esetében frakciók közötti átmenetekre (egyes frakciók mások javára/kárára történő alul-/túlreprezentáltsága) világított rá. Végül a Pario<sup>®</sup>-textúraanalízis eredményekre, illetve a minta-előkészítéséhez kötődő változókra (ld. regressziós a egyenletek alatt) – mint prediktorokra (bemeneti paraméterekre) – támaszkodva, szemi-empirikus regressziós modell segítségével korrigáltuk az adatokat. Részletek a témában született cikkben olvashatóak (Mátra et al., 2022). A Pario<sup>®</sup> mérések konverziója Köhn-pipettás ( $\hat{A}$ ) agyag-, ( $\hat{I}_{össz}$ ) összes iszap-, ( $\hat{I}_f$ ) finom iszap- és ( $\hat{I}_d$ ) durva iszap-frakciókká (tömegszázalékban) az alábbi egyenletekkel lehetséges:

$$\begin{aligned} \hat{A} = & 2,2313 + 0,5731 \cdot A^{Pario} + 0,6115 \cdot I_f^{Pario} \\ & - 0,2875 \cdot I_k^{Pario} + 0,1414 \cdot I_d^{Pario} + 4,2702 \cdot \Theta + 0,6563 \cdot pH_{H_2O} \end{aligned} \quad (9)$$

$$\begin{aligned} \hat{I}_{össz} = & 0,1600 + 0,2811 \cdot A^{Pario} + 1,1439 \cdot I_k^{Pario} \\ & + 0,9695 \cdot I_d^{Pario} - 2,5886 \cdot \Theta - 0,8369 \cdot pH_{H_2O} \end{aligned} \quad (10)$$

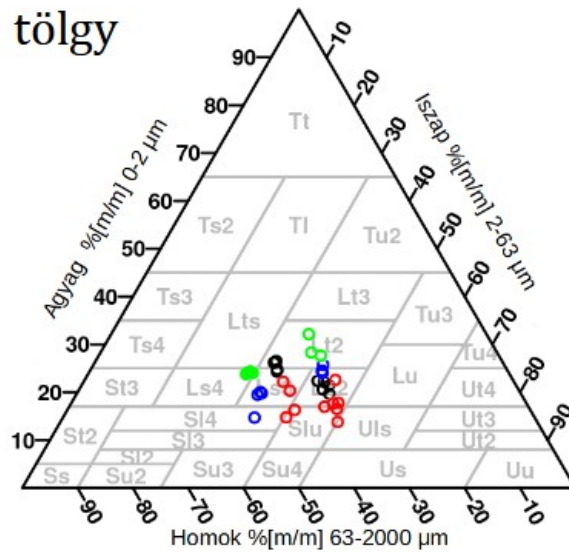
$$\begin{aligned} \hat{I}_f = & 1,6206 + 0,1009 \cdot A^{Pario} + 0,1938 \cdot I_f^{Pario} + 0,2236 \cdot I_k^{Pario} \\ & - 0,7005 \cdot \Theta - 0,3610 \cdot pH_{H_2O} + 0,1711 \cdot C/N + 0,1607 \cdot SOC \end{aligned} \quad (11)$$

$$\hat{I}_d = 0,5362 + 0,1107 \cdot A^{Pario} + 0,8831 \cdot I_d^{Pario} - 1,4424 \cdot \Theta - 0,4034 \cdot C/N \quad (12)$$

ahol a prediktorok első csoportját a Pario<sup>®</sup> mérések eredményeül kapott agyag-, finom iszap-, közép iszap- és durva iszap- frakció-tömegszázalék adatok képezték, ezek jelölése rendre:  $A^{Pario}$ ,  $I_f^{Pario}$ ,  $I_k^{Pario}$  és  $I_d^{Pario}$ . A prediktorok második csoportjába pedig a minta-előkészítéshez köthető változók tartoztak:  $SOC$  a minták szerves széntartalma % [m/m];  $\Theta$  a felületen adszorbeált nedvesség, vagyis a talajminták tömegdifferenciája 40 °C és 105 °C között [g];  $pH_{H_2O}$  a minták vizes pH-ja; és  $C/N$  a minták C/N aránya.

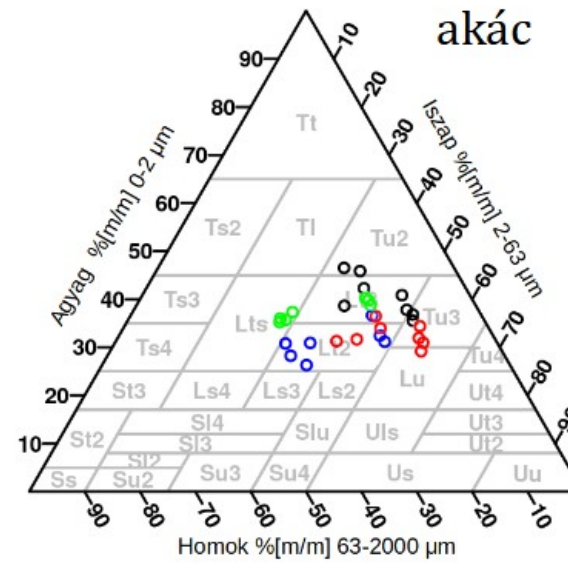


tölgy

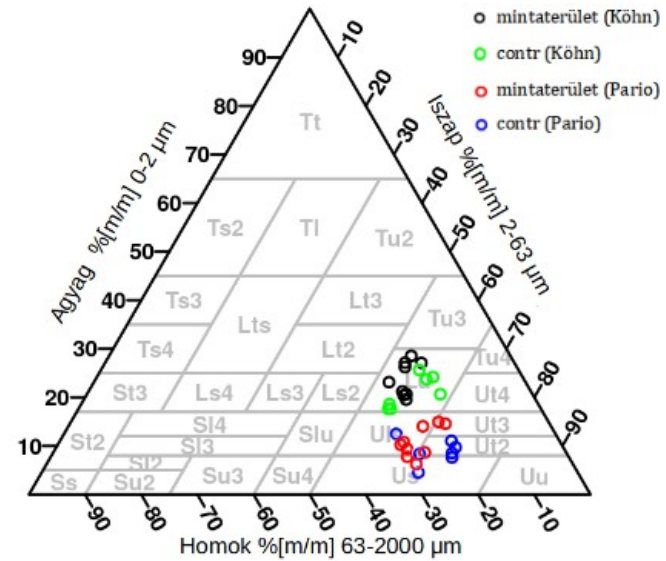
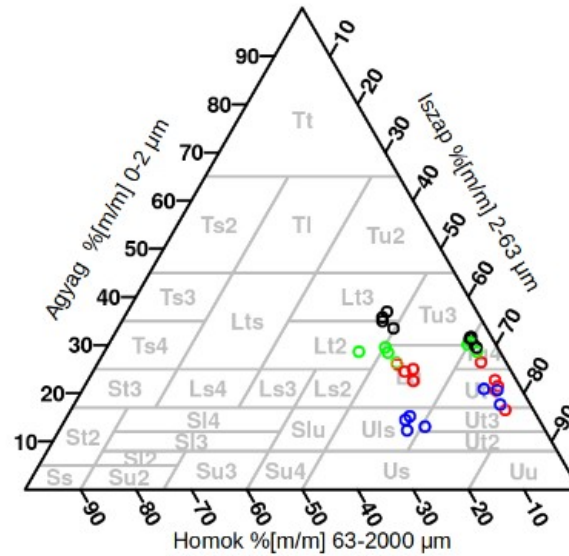


„Nógrád“

akác



„Somogy“



18. ábra. 64 textúraanalízis-pár (fafaj és megye szerinti) ábrázolása a KA-5 besorolása szerint. A vizsgálat két különböző eszközzel (Köhn-pipetta és Pario®) készült, valamennyi minta- és kontrollterületen. Az ismételt Pario® mérések mediánjai láthatóak a diagramon.

Régió	Terület	Sorszám	Rendeltetés; generáció	KA–5 besorolás (Pario®)	USDA besorolás (Pario®)	KA–5 besorolás (Köhn)	USDA besorolás (Köhn)
„Nógrád”	Vizslás 8/G	145–157	fehér akác ültetvény; 1. gen.	Tu3/Lu	iaV	Lt3/Tu3	iaV/iA
	contr	162–168	mezőgazdasági terület	Lt3/Lt2	aV/iaV	Lt3	iA/iaV
	Szirák 8/E	171–181	fehér akác ültetvény; n. gen.	Lt2/Lt3	aV/iaV	Tu2/Lt3	A/aV
	contr	186–192	mezőgazdasági terület	Lt2	aV/V	Lts	aV
	Tolmács 16/E	195–205	kocsánytalan tölgy erdő; 1. gen.	Ls3/Slu	V	Lt2/Ls3	V
	contr	210–216	mezőgazdasági terület	Ls3/Sl4	V	Ls4	V
	Nógrád 51/E	217–229	kocsánytalan tölgy erdő; n. gen.	Ls2/Slu/Uls	V/iV	Ls2/Lt2	V
contr	234–240	mezőgazdasági terület	Lt2/Ls2	V	Lt2	aV/V	
„Somogy”	Somogytúr 46/O	003–013	fehér akác ültetvény; 1. gen.	Uls/Ut3	iV	Lu	iV/iaV
	contr	033–039	mezőgazdasági terület	Ut2/Us	iV	Lu	iV
	Somogytúr 12/B	016–028	fehér akác ültetvény; n. gen.	Uls/Us/Ut2	iV	Lu	iV
	contr	042–048	vadföld	Uls/Us/Ut2	iV	Lu	iV
	Koppányszántó 31/A	097–109	kocsánytalan tölgy (+cser) erdő; 1. gen.	Tu4/Ut4/Ut3	iV	Tu3/Tu4	iaV
	contr	114–120	mezőgazdasági terület	Ut4	iV	Tu3/Tu4/Lu	iaV
	Balatonszemes 5/C	123–133	Kocsánytalan tölgy erdő; n. gen.	Lu	iV	Lt3/Lt2	iaV
	contr	138–144	vadföld	Uls/Ut3	iV	Lt2/Lu	aV/iV

3. táblázat. A kutatásban érintett minta- és kontrollterületek textúraadatainak áttekintése. Az egyes területek a német KA–5 (Sponagel et al., 2005), illetve az USDA (2017) textúrabesorolás szerint is fel vannak tüntetve. A táblázatban használt színek megfeleltethetőek a textúraháromszögek (18. ábra) jelölőszíneinek: feketével, illetve zölddel szedve a Köhn-pipettás mérések a minta-, illetve a kontrollterületekre; valamint pirossal, illetve kézzel szedve Pario® mérések a minta-, illetve a kontrollterületekre vonatkozóan.

Jelölések, KA–5 besorolás:

Us: Homokos iszap	Lts: Homokos-agyagos vályog	Tu2: Gyengén iszapos agyag
Uls: Homokos-vályogos iszap	Lt2: Gyengén agyagos vályog	Tu3: (Közepesen) iszapos agyag
Ut2: Gyengén agyagos iszap	Lt3: (Közepesen) agyagos vályog	Tu4: Erősen iszapos agyag
Ut3: (Közepesen) agyagos iszap	Ls2: Gyengén homokos vályog	Slu: Iszapos-vályogos homok
Ut4: Erősen agyagos iszap	Ls3: (Közepesen) homokos vályog	Sl4: Erősen vályogos homok
Lu: Iszapos vályog	Ls4: Erősen homokos vályog	

Jelölések, USDA besorolás:

V: Vályog
aV: Agyagos vályog
iV: Iszapos vályog
iaV: Iszapos-agyagos vályog
A: Agyag
iA: Iszapos agyag

## 5.6. A talaj szervesanyag-raktárai

Az egyes fafajok befolyását a talaj három, különböző tartósságú (ellenálló képességű) szénraktárára (fLF-, oLF- és HF-frakciók), első lépésben a szén mennyiségén (koncentráció [ $g_{\text{frakció}} \cdot g^{-1}$ ]) keresztül vizsgáltuk; régióként, illetve szintenként külön-külön. Ehhez U-teszt segítségével páronként vetettük egybe a minta- és kontrollterületeket, illetve az első- és tizededik generációs állományokat (19. a-b ábra). A három elkülönített SOM-frakcióra vonatkozó megtalálási ráták összefoglaló adatait (minimum, medián, átlag, maximum és szórás adatok) ösztömegre, szerves szénre és a nitrogénre a 4. táblázatban foglaltuk össze. Ezek az adatok a frakcionálási eljárás során fellépő mintaanyag-veszteség mértékéről adnak információt. A táblázatot áttekintve látható, hogy a gondos munkavégzés ellenére sajnos számottevő veszteségek és kontamináció is felléphetett.

	Megtalált tömeg % [m/m]		Megtalált $C_{\text{org}}$ % [m/m]		Megtalált $N_{\text{össz}}$ % [m/m]	
	„Nógrád”	„Somogy”	„Nógrád”	„Somogy”	„Nógrád”	„Somogy”
<i>min.</i>	76,49	80,81	62,76	60,03	62,74	63,79
$\tilde{x}$	89,01	89,56	94,74	82,83	99,85	100,46
$\bar{x}$	87,69	89,96	99,24	83,33	102,10	108,39
<i>max.</i>	96,96	96,18	169,58	118,21	163,96	178,93
$\sigma$	5,21	2,91	22,64	9,64	20,37	22,72

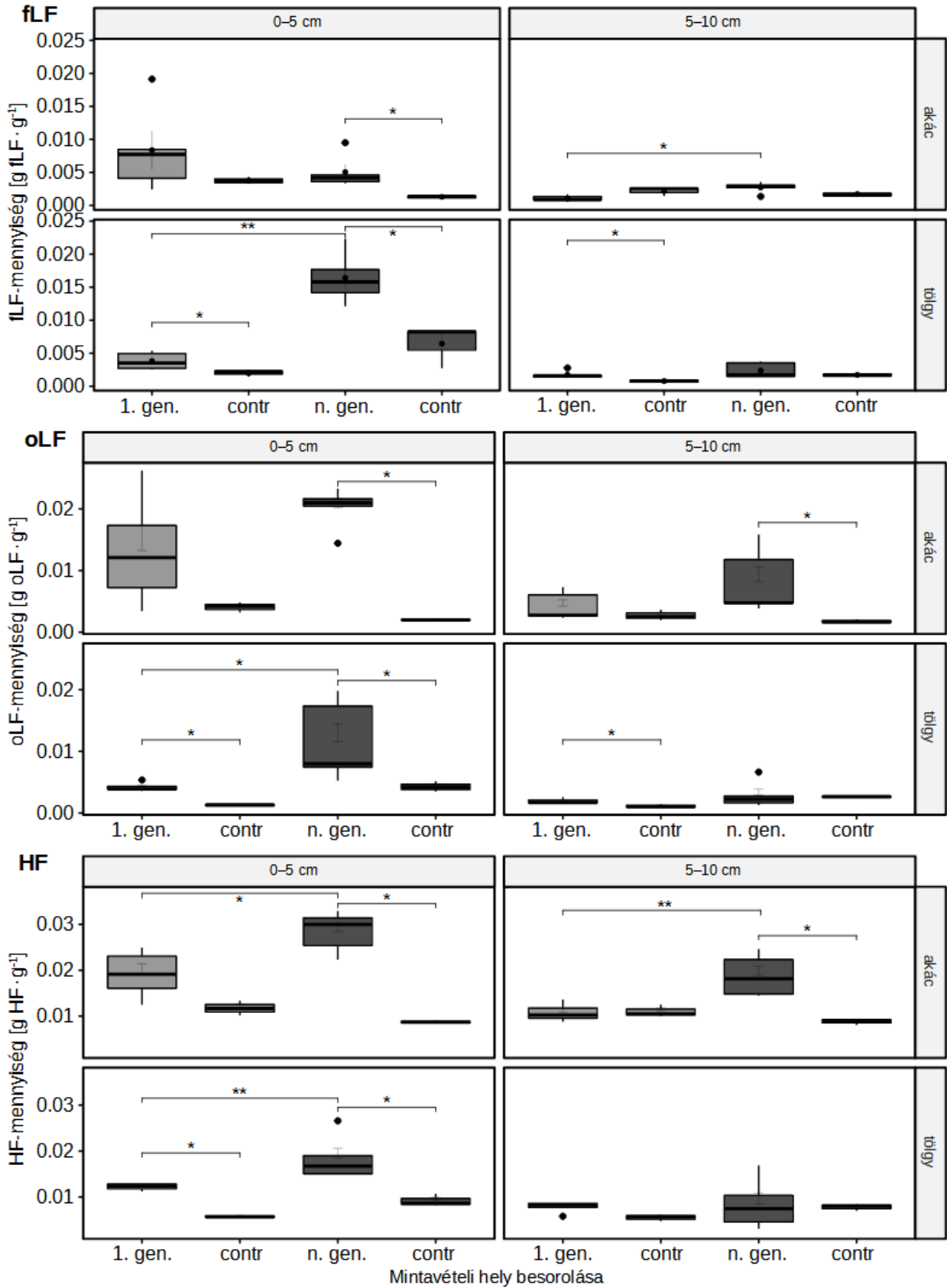
4. táblázat. A sűrűségkülönbség-alapú SOM frakcionálás megtalálási rátáinak összefoglaló adatai a kezdeti mintatömegre, a referencia szén- és nitrogénmennyiségekre vonatkoztatva.

A szén mennyiségeket egymáshoz hasonlítva a két fafaj és szint vonatkozásában a két régióban összesen 38 db szignifikáns eltérés adódott. Bár a „nógrádi” és „somogyi” régió szignifikancia-viszonyainak „mintázata” valamelyest különbözött, számos hasonlóság is mutatkozott. Érdekes módon fafajra vetítve a szignifikáns eltérések száma a két régióban eltérően alakult: míg a „nógrádiban” 8 db adódott az akácok, és 11 db a tölgyesek vonatkozásában, addig a „somogyiban” majdnem fordítva, 12 db az akácokra és 7 db a tölgyesekre. Az egyes frakciók a teszt szerint viszonylag kiegyenlített képet mutattak: „Nógrádban” 6–6 db szignifikancia-eltérés volt az fLF- és az oLF-frakcióknál, és 7 db a HF-nél; „Somogyban” 7 db adódott az fLF-frakcióra, illetve 6–6 db az oLF-re és a HF-re. A két régióban egyöntetű, valamennyi SOM-frakciót érintő szignifikancia-eltérések a 0–5 cm-es szint esetében, az 1. generációs tölgy állományok és kontrollterületeik-, illetve az 1. és n. generációs tölgy állományok között mutatkoztak; vagyis tölgyeseknél a 0–5 cm-es szintben a szervesanyag-készlet mindkét régió és valamennyi frakció esetében a kontrollterület < 1. generációs állomány < n. generációs állomány reláció szerint növekedett. A „nógrádi” régióban az n. generációs akácok alatti szénkészlet a 0–5 cm-es szintben valamennyi frakció esetében szignifikánsan magasabb volt, mint a kontrollterületeiké;

illetve a HF-frakció esetében szignifikáns eltérés adódott az 1. és n. generációs akácállományok készletadataira is, utóbbi javára. „Nógrádban” az 5–10 cm-es szintben tölgyesek esetében csak az 1. generációs állományok és kontrollterületeik között mutatkozott szignifikáns differencia, az fLF- és az oLF frakciókban. Itt is a faállománnyal borított termőhelyek készletadatai voltak magasabbak a kontrollterületekénél. Ugyanebben a régióban és szintben az akác vonatkozásában négy szignifikáns eltérés adódott: az 1. generációs állomány készlete kisebb volt, mint az n. generációs az fLF-frakció esetében; az n. generációs állomány készlete nagyobb volt mint a kontrollterületé az oLF-frakció esetében; illetve mind az 1. generációs állomány, mind az n. generációs állomány kontrollterületének készlete kisebb volt, mint az n. generációs állományé a HF-frakcióban. A „somogyi” régióban a 0–5 cm-es szintben az 1. generációs akác fLF-készletadata szignifikánsan magasabb volt a hozzá tartozó kontrollterületénél. Ugyanakkor az n. generációs akácos kontrollterületén mind a 0–5, mind az 5–10 cm-es szintben szignifikánsan magasabb fLF-készlet mutatkozott, mint magán a mintaterületen. A jelenség összefügghet a kontrollterület pH-jának eltéréseivel is: feltételezhetően valamilyen talajjavító tevékenység (és/vagy szerves trágyázás) állhat a háttérben. Az 5–10 cm-es szintben tölgyesek vonatkozásában mindössze egyetlen szignifikáns eltérés adódott; mégpedig, hogy a szabad könnyű szerves anyag (fLF) az n. generációs állomány alatt a szignifikánsan több volt, mint az 1. generációs alatt. Az oLF-frakció tekintetében a két szintben két-két szignifikáns eltérés mutatkozott az akác vonatkozásában: az 1. és n. generációs állományok és kontrollterületeik között a 0–5 cm-es szintben; valamint az 1. és n. generációs állományok között és az n. generációs állomány és kontrollterülete között az 5–10 cm-es szintben. Ezekben szervesanyag-készlet újra a kontrollterület < 1. generációs állomány < n. generációs állomány sorrendben növekedett. A HF-frakcióban szignifikáns készletkülönbség mutatkozott a 0–5 cm-es szintben az 1. és n. generációs akácos készletei között, utóbbi javára. Az 5–10 cm-es szintben ugyanakkor az 1. generációs akácos kontrollterülete mutatott a mintaterületénél szignifikánsan nagyobb készletet. Ugyanebben a szintben az n. generációs akácos készlete szignifikánsan nagyobb volt a kontrollterületénél, valamint az 1. generációs akácosénál is. (Az U-tesztek p-értékeit a Függelék F7. táblázatban közöljük.)

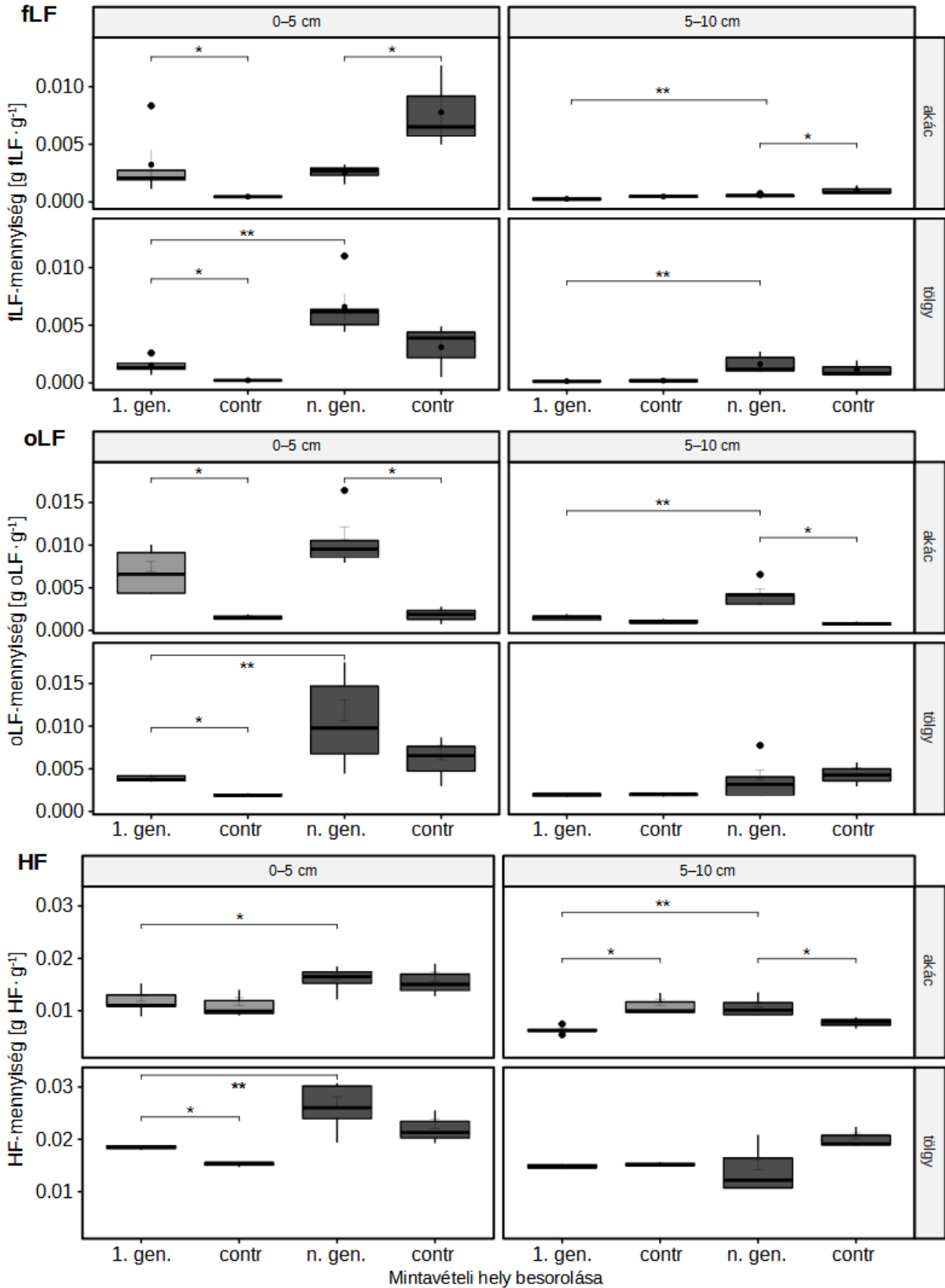
Mindez (1) a tölgy és akác faj egyértelmű befolyását igazolja termőhelye szabad, illetve közép- és hosszútávon kötött szervesanyag-készletére, továbbá az is látható, hogy (2) a két régióban a tölgy faj befolyása (páronként) hasonló, a „nógrádi” régióban valamelyest kifejezettebb, ugyanakkor (3) az akácé a régiók között (szintén páronként) némileg eltér (mértékében és tendenciáiban).

## „Nógrád“



19. a. ábra. A szerves anyag mennyiségének frakciók szerinti alakulása a "nógrádi" minta- és kontrollterületeken. Balról a 0–5 cm-es, jobbról az 5–10 cm-es szint adatai olvashatóak le, felül az akác-, alul a tölgy minta-és kontrollterületekre vonatkozóan. (N=5 a mintaterületek, illetve N=3 kontrollterületek esetében). A szignifikáns eltéréseket (U-teszt alapján) kapcsolok, a szignifikanciaszintet csillagok jelölik.

## „Somogy“



19. b. ábra. A szerves anyag mennyiségének frakciók szerinti alakulása a "somogyi" minta- és kontrollterületeken. Balról a 0–5 cm-es, jobbról az 5–10 cm-es szint adatai olvashatóak le, felül az akác-, alul a tölgy minta- és kontrollterületekre vonatkozóan. (N=5 a mintaterületek, illetve N=3 kontrollterületek esetében). A szignifikáns eltéréseket (U-teszt alapján) kapcsok, a szignifikanciaszintet csillagok jelölik.

Az egyes SOM-frakciók készletváltozására ható tényezők nem mérhetőek közvetlenül, azt több faktor interakciói befolyásolják. Ezen összefüggések feltárásához következő lépésben az Anyag és módszer 4.3.5. fejezetében leírtaknak megfelelően lineáris kevert-hatás modelleket alkalmaztunk. Mérési eredményeinkre támaszkodva a két faj befolyása mellett egyéb tényezők hatását igyekeztünk kimutatni, amelyek a három SOM-frakció készletnövekedésére vagy az ellen hatnak; függetlenül egy-egy konkrét termőhely sajátosságaitól (a „véletlen effektusok”). A modellezést a két szintre valamennyi esetben külön-külön végeztük el (azok egymástól függetlenek). A modellezéshez az eddig tárgyalt valamennyi mérési eredményt igénybe vettük, mint bemeneti paramétert; viszont (a két faj leszámlítva) megtartásra csak azok kerültek közülük, amelyek szignifikáns befolyással bírtak a készletbecslésre (célváltozóra). Az egyes prediktorok a megadott konfidenciaintervallumon belüli abszolút mértékben járulnak hozzá adott frakció készletbecsléséhez a talajban, a célváltozó pedig az átlagos várható készletváltozást adja meg. Vagyis adott prediktor esetében minden egységnyi változás a jelölt mértékű (abszolút) csökkenést, vagy növekedést okoz a vizsgált frakció szervesanyag-készletében. Ennek megfelelően fontos tekintetbe venni az egyes frakciók mennyiségi dimenzióit is, hiszen a különösen alacsony tömegű frakciók (fLF, oLF) esetében a kisebb számok is viszonylag nagy befolyást jelenthetnek. A modellezés során az egyes fajok befolyását a fátlan kontrollterületekéhez hasonlítottuk.

A modellezéshez a reziduálisok normalitás-vizsgálata a Függelék f1. a-f. ábráin láthatóak. Adott modell megbízhatóságát a „marginal  $R^2$ ” és a „conditional  $R^2$ ” jellemzik; előbbi az eltérés mértékét kizárólag a rögzített effektusokkal írja le, míg utóbbi a rögzített és véletlen effektusokkal együtt. Ezt megerősítő kereszt-validációkat is végeztünk, ezek  $R$ -értékei, valamint a multikollinearitás-próbák eredményei megtalálhatóak a Függelék F8. a-l. táblázataiban. A SOM-frakcionálás főbb nyers adatai a Függelék F5. táblázatában tekinthetőek át.

A legmagasabb mobilitású frakció (fLF) mennyiségi sajátosságainak alakításában mindkét szint vonatkozásában több faktor játszott közre (4. a-b. táblázat). Ezek közül legegyszerűbb a közvetlen szervesanyag-input szerepe, vagyis a szerves szén mennyisége, amely a 0–5 cm-es szintben szignifikáns prediktor volt. Ehhez kapcsolódóan (ugyanebben a szintben) a referencia C/N arány, mint szignifikáns prediktor a termőhely mikrobiális aktivitására utalhat: a nagyobb arányszám (a szén és nitrogén százalékos értékeinek egymástól való távolabb esése) az alacsonyabb aktivitású termőhelyek jellemzője. Vagyis a kisebb biológiai aktivitás elősegíti ennek a lebontás alacsony fokán álló frakciónak a gyarapodását/felhalmozódását. Az agyag magasabb részaránya kis mértékben, de szignifikánsan az fLF-frakció készletnövekedése ellen hatott a 0–5 cm-es szintben. Ennek egy lehetséges magyarázata, hogy az agyag és a SOM együttes jelenléte elősegíti a tartósabb szerves-ásványi komplexek kialakulását, amely hatására a szabad

könnyű frakció szerves készletének egy része hosszabb távra megkötődik. (Az agyag mennyisége valamennyi termőhelyet tekintve > 16,95% [m/m] feletti volt, vagyis vélhetően nem limitálta ezen komplexek kialakulását, illetve az aggregátum-képződési folyamatokat.) Az akác jelenléte a 0–5 cm-es szintben szignifikánsan az fLF-frakció készletnövekedése ellen hatott, fátlan kontrollterületekkel egybevetve. Ebben a szintben hasonló, bár kisebb mértékű negatív összefüggést kaptunk a tölgy esetében is, amely ugyanakkor nem volt szignifikáns. Az fLF-frakció C/N aránya mind a 0–5, mind az 5–10 cm-es szintben szignifikáns prediktor volt, viszont negatív összefüggésben. Ez a paraméter leginkább a fafaji befolyásra kialakuló mikrobiális környezet (specifikus lebontók/szaprotrofok) befolyásaként értelmezhető. A negatív előjel azt jelezheti, hogy míg a fátlan vegetáció a magas mobilitású frakció (fLF) kialakulásához (és gyarapodásához) teremt kedvezőbb környezetet, addig a fajok a kedvezőbb (aktívabb) mikrobiális környezet kialakításával a szerves szén tartós megkötését segítik elő (szerves-ásványi kötésekkel). Ez a szén-körfogságból kikerülő szerves anyag a könnyű frakcióban hiányként jelentkezik. Az 5–10 cm-es szintben a tölgy faj szignifikáns készletnövelő hatását igazoltuk az fLF-frakcióban, a fátlan területekhez képest. Az akác ugyanitt az fLF-frakció készletnövekedése ellen hatott, bár ez a befolyás nem volt szignifikáns. Szintén az 5–10 cm-es szintben, egy további szignifikáns prediktor jutott szerephez: a nehéz frakció (HF) mennyiségi adata, amely az fLF-frakció készletnövekedése ellen hatott. Ez leginkább úgy értelmezhető, hogy a feltalaj ezen rétegében a legtartósabb organo-minerális kötések kialakulásához kedvező feltételek a szabad könnyű frakció készletgyarapodása ellen hatnak.

A kötött könnyű frakció (oLF) készletváltozásaira (5. a-b. táblázat) a 0–5 cm-es szintben a már tárgyalt szervesanyag-input (a szerves szén mennyisége), a faj (mégpedig az akác), harmadsorban pedig a pH-érték hatott szignifikánsan; mindhárom prediktor pozitívan. Mivel a vizsgált helyszínek többsége a savanyú tartományba esett, illetve mindkét faj talajsavanyító hatását leírták, a jelenség leginkább úgy értelmezhető, hogy a túlságosan savanyú körülmények gátolhatják a szerves-ásványi kötések kialakulását; vagyis a pH növekedése elősegítheti az oLF-frakció készletgyarapodását. Az agyag magasabb részaránya csekély mértékben, de szignifikánsan az oLF-frakció készletnövekedése ellen hat a 0–5 cm-es szintben. A jelenséget nehéz megindokolni, egy esetleges magyarázat lehet túlzottan kötött talajok esetében az edafikus tevékenység gátoltsága, és ezen keresztül az organo-minerális egységek létrejöttének nehezítettsége. A tölgy faj befolyása az oLF-re sem a 0–5 cm-es, sem az 5–10 cm-es szintben nem volt szignifikáns. Ezzel szemben az akác szignifikáns pozitív befolyását igazoltuk az 5–10 cm-es szintben az oLF-frakció készletnövekedésére. Az eddigiekhez hasonlóan az oLF-frakció készletgyarapodására az 5–10 cm-es szintben is szignifikánsan pozitív befolyással volt a szerves szén mennyisége.



A tartósan kötött, nehéz frakció (HF) készletváltozására (6. a-b. táblázat) biztosan ható tényezők közül sikerült a legkevesebbet azonosítani. A 0–5 cm-es szintben egyedüli szignifikáns prediktor a szerves szén mennyisége volt, negatív kontextusban. Vagyis a magas szervesanyag-input gátolja a szerves szén ásványi felületen történő hosszútávú megkötését. Ennek valószínű magyarázata, hogy a „frissebb” szerves anyag jelenléte a C/N arány csökkentésén keresztül megnöveli a biológiai aktivitást, amely összességében a mineralizálódás ellen hathat. Ugyanebben a szintben a két faj nem fejtett ki szignifikáns hatást a készletváltozásra. (Érdekes módon az adszorbeált felületi nedvességtartalmat és/vagy az agyag százalékot és/vagy a szervesanyag-tartalmat mint prediktorokat a modellben együtt alkalmazva rendkívül robusztus összefüggés állt elő a két faj HF-készlet változásban betöltött szerepére a 0–5 cm-es szintben; viszont ezeket a változók szoros összefüggése (kollinearitás) miatt elvetettük.) Az 5–10 cm-es szintben viszont igazoltuk a tölgy szignifikáns befolyását a nehéz frakció készletnövekedésére, ugyanakkor az akác befolyása nem volt szignifikáns. Az össz-nitrogéntartalom, mint prediktor szignifikánsan negatív összefüggést mutatott a HF-frakció készletváltozására az 5–10 cm-es szintben. Ez az effektus a 0–5 cm-es szintben már leírt jelenséghez kapcsolható: a nitrogén nagyobb arányú jelenléte a biológiai aktivitás fokozásán keresztül a mineralizálódás ellen hathat. További szignifikáns prediktor volt az 5–10 cm-es szintben az agyag százalékos értéke, amely az fLF- és oLF-frakciókhoz hasonlóan itt is negatív összefüggésben mutatkozott. Magyarázataként az oLF-frakció esetében tárgyalt (bizonytalan) elméletet tudjuk megadni.

A modellezéssel kapott összefüggések alapján az is látható, hogy az egyes frakciók mennyiségi alakulása a vizsgált talajokban többnyire nem bír szignifikáns befolyással más frakciók mennyiségére. Kivétel: a nehéz frakció (HF) és a szabad könnyű frakció (fLF) mennyisége közötti szignifikáns összefüggés. Következtetés: a szervesanyag-megkötés folyamata e talajokban nem (feltétlen) a várt utat (fLF → oLF → HF) követi, vagyis a könnyű frakció(k) gyarapodása, (illetve az ahhoz kedvező feltételek) nem feltétlenül kedveznek a tartós frakciók mennyiségi gyarapodásának.

Az egyes SOM-frakciókban mért (szerves) szén koncentrációkat a 0–10 cm-es szintre összesítve, valamennyi minta- és kontrollterület vonatkozásában a függelék F6. táblázatában foglaltuk össze.

<b>m<sub>FLF</sub> &lt;0-5 cm&gt;</b>			
<b>Prediktorok (rögített effektusok)</b>	<b>célváltozó (abszolút)</b>	<b>Konfidencia- intervallum</b>	<b>p-érték</b>
<i>(Intercept)</i>	0,11	-1,70 – 1,91	0,906
<b>Szerves szén (C<sub>org</sub>) % [m/m]</b>	0,18	0,02 – 0,35	<b>0,029</b>
<b>Agyag % [m/m]</b>	-0,03	-0,05 – -0,01	<b>0,001</b>
<b>C<sub>org</sub>/N<sub>össz</sub> arány</b>	0,26	0,10 – 0,42	<b>0,002</b>
<i>Tölgy</i>	-0,29	-0,64 – 0,06	0,107
<b>Akác</b>	-0,62	-0,94 – -0,29	<b>&lt;0,001</b>
<b>C/N arány fLF</b>	-0,09	-0,14 – -0,04	<b>&lt;0,001</b>
<b>Véletlen effektusok</b>			
N <sub>Helvszín</sub>	16		
N <sub>Megve</sub>	2		
Mintaszám (Observations)	64		
Marginal R <sup>2</sup> / Conditional R <sup>2</sup>	0,547 / 0,658		

<b>m<sub>FLF</sub> &lt;5-10 cm&gt;</b>			
<b>Prediktorok (rögített effektusok)</b>	<b>Célváltozó (abszolút)</b>	<b>Konfidencia- intervallum</b>	<b>p-érték</b>
<i>(Intercept)</i>	2,59	1,42 – 3,75	<b>&lt;0,001</b>
<b>C/N arány fLF</b>	-0,04	-0,05 – -0,03	<b>&lt;0,001</b>
<b>Tölgy</b>	0,26	0,01 – 0,51	<b>0,042</b>
<i>Akác</i>	-0,17	-0,41 – 0,07	0,152
<b>HF-mennyiség (m<sub>HF</sub>) [g<sub>HF</sub>]</b>	-0,08	-0,14 – -0,03	<b>0,002</b>
<b>Véletlen effektusok</b>			
N <sub>Helvszín</sub>	16		
N <sub>Megve</sub>	2		
Mintaszám (Observations)	64		
Marginal R <sup>2</sup> / Conditional R <sup>2</sup>	0.305 / 0.859		

4. a-b. táblázat. Az fLF-frakció készletváltozását a 0–5 cm-es (felül) és az 5–10 cm-es (alul) szintben leíró modellek főbb paraméterei. A szignifikáns prediktorok, illetve p-értékeik (p < 0,05) félkövérrel vannak kiemelve.

<b>m<sub>oLF</sub> &lt;0–5 cm&gt;</b>			
<b>Prediktorok (rögített effektusok)</b>	<b>Célváltozó (abszolút)</b>	<b>Konfidencia- intervallum</b>	<b>p-érték</b>
<i>(Intercept)</i>	-0,73	-1,27 – -0,19	0,009
<b>Agyag % [m/m]</b>	-0,01	-0,02 – 0,00	<b>0,034</b>
<b>Szerves szén (C<sub>org</sub>) % [m/m]</b>	0,23	0,19 – 0,27	<b>&lt;0,001</b>
<b>Vizes pH (pH<sub>H2O</sub>)</b>	0,11	0,04 – 0,17	<b>0,002</b>
<i>Tölgy</i>	0,01	-0,12 – 0,14	0,871
<b>Akác</b>	0,18	0,04 – 0,31	<b>0,012</b>
<b>Véletlen effektusok</b>			
N <sub>Helvszín</sub>	16		
N <sub>Meeve</sub>	2		
Mintaszám (Observations)	64		
Marginal R <sup>2</sup> / Conditional R <sup>2</sup>	0.654 / 0.907		

<b>m<sub>oLF</sub> &lt;5–10 cm&gt;</b>			
<b>Prediktorok (rögített effektusok)</b>	<b>Célváltozó (abszolút)</b>	<b>Konfidencia- intervallum</b>	<b>p-érték</b>
<i>(Intercept)</i>	-0,07	-0,15 – 0,00	0,051
<b>Szerves szén (C<sub>org</sub>) % [m/m]</b>	0,13	0,10 – 0,16	<b>&lt;0,001</b>
<i>Tölgy</i>	-0,01	-0,06 – 0,05	0,791
<b>Akác</b>	0,07	0,02 – 0,13	<b>0,010</b>
<b>Véletlen effektusok</b>			
N <sub>Helvszín</sub>	16		
N <sub>Meeve</sub>	2		
Mintaszám (Observations)	64		
Marginal R <sup>2</sup> / Conditional R <sup>2</sup>	0,632 / 0,703		

5. a-b. táblázat. Az oLF-frakció készletváltozását a 0–5 cm-es (felül) és az 5–10 cm-es (alul) szintben leíró modellek főbb paraméterei. A szignifikáns prediktorok, illetve p-értékeik (p < 0,05) félkövérrel vannak kiemelve.

<b>m<sub>HF</sub> &lt;0-5 cm&gt;</b>			
<b>Prediktorok (rögzített effektusok)</b>	<b>Célváltozó (abszolút)</b>	<b>Konfidencia- intervallum</b>	<b>p-érték</b>
<b><i>(Intercept)</i></b>	21,99	21,00 – 22,99	<b>&lt;0,001</b>
<b><i>Szerves szén (C<sub>org</sub>) % [m/m]</i></b>	-0,49	-0,69 – -0,29	<b>&lt;0,001</b>
<i>Tölgy</i>	0,91	-0,16 – 1,99	0,095
<i>Akác</i>	0,42	-0,68 – 1,53	0,446
<b>Véletlen effektusok</b>			
N <sub>Helvszín</sub>	16		
N <sub>Megve</sub>	2		
Mintaszám (Observations)	64		
Marginal R <sup>2</sup> / Conditional R <sup>2</sup>	0,256 / 0,828		

<b>m<sub>HF</sub> &lt;5-10 cm&gt;</b>			
<b>Prediktorok (rögzített effektusok)</b>	<b>Célváltozó (abszolút)</b>	<b>Konfidencia- intervallum</b>	<b>p-érték</b>
<b><i>(Intercept)</i></b>	25,48	24,49 – 26,46	<b>&lt;0,001</b>
<b><i>Agyag % [m/m]</i></b>	-0,13	-1,16 – -0,10	<b>&lt;0,001</b>
<b><i>Nitrogéntartalom (N<sub>össz</sub>) % [m/m]</i></b>	-2,67	-5,15 – -0,18	<b>0,036</b>
<i>Tölgy</i>	0,58	0,08 – 1,08	<b>0,022</b>
<i>Akác</i>	0,08	-0,42 – 0,59	0,743
<b>Véletlen effektusok</b>			
N <sub>Helvszín</sub>	16		
N <sub>Megve</sub>	2		
Mintaszám (Observations)	64		
Marginal R <sup>2</sup> / Conditional R <sup>2</sup>	0,771 / 0,883		

6. a-b. táblázat. A HF-frakció készletváltozását a 0–5 cm-es (felül) és az 5–10 cm-es (alul) szintben leíró modellek főbb paraméterei. A szignifikáns prediktorok, illetve p-értékeik ( $p < 0,05$ ) félkövérrel vannak kiemelve.

## 5.7. A referencia- és a SOM-frakciónkon belüli C/N arányok

A SOM-frakciók és a termőhelyek általános (referencia) C/N arányainak egybevetése a mikrobiális lebontottság (komposztálódottság) mértékén keresztül a szerves anyag mobilitására enged következtetni adott termőhelyen (20. ábra). Az arányok egybevetése a SOM-frakciók készletváltozásaival kapcsolatos összefüggések alátámasztását, illetve – lehetőség szerint – további magyarázatát szolgálta.

A referenciaértékeket szemügyre véve látható, hogy valamennyi, a kísérletbe vont terület jó tápanyag-ellátásúnak tekinthető; a 0–10 cm közötti szintekben a „somogyi” régióban 9,2–17,1 közötti, míg „nógrádi” régióban 8,9–13,2 közötti viszonyszámok adódtak. A „somogyi” régióban az első generációs akácos kontrollterületén (mezőgazdasági terület) mindkét szintben némileg kiugró értékeket kaptunk, amelyet felehetően gyengén komposztálódott szerves anyag (vagy műtrágya) jelenléte okozhatott. Méréseink alapján látható, hogy a többedik generációs állományok termőhelyein a C/N arányok mindkét faj esetében szignifikánsan eltértek a kontrollterületekétől (a „somogyi” akácos kivételével). Az első generációs állományok befolyása mérsékeltebb, a kontrollterületekkel egybevetve egyik esetben sem volt szignifikáns. A fás vegetációval borított területeken az avar jelentette rendszeres input (alacsony lebontottságú SOM) általánosságban az arányszámok magasabb szórásában is megmutatkozott.

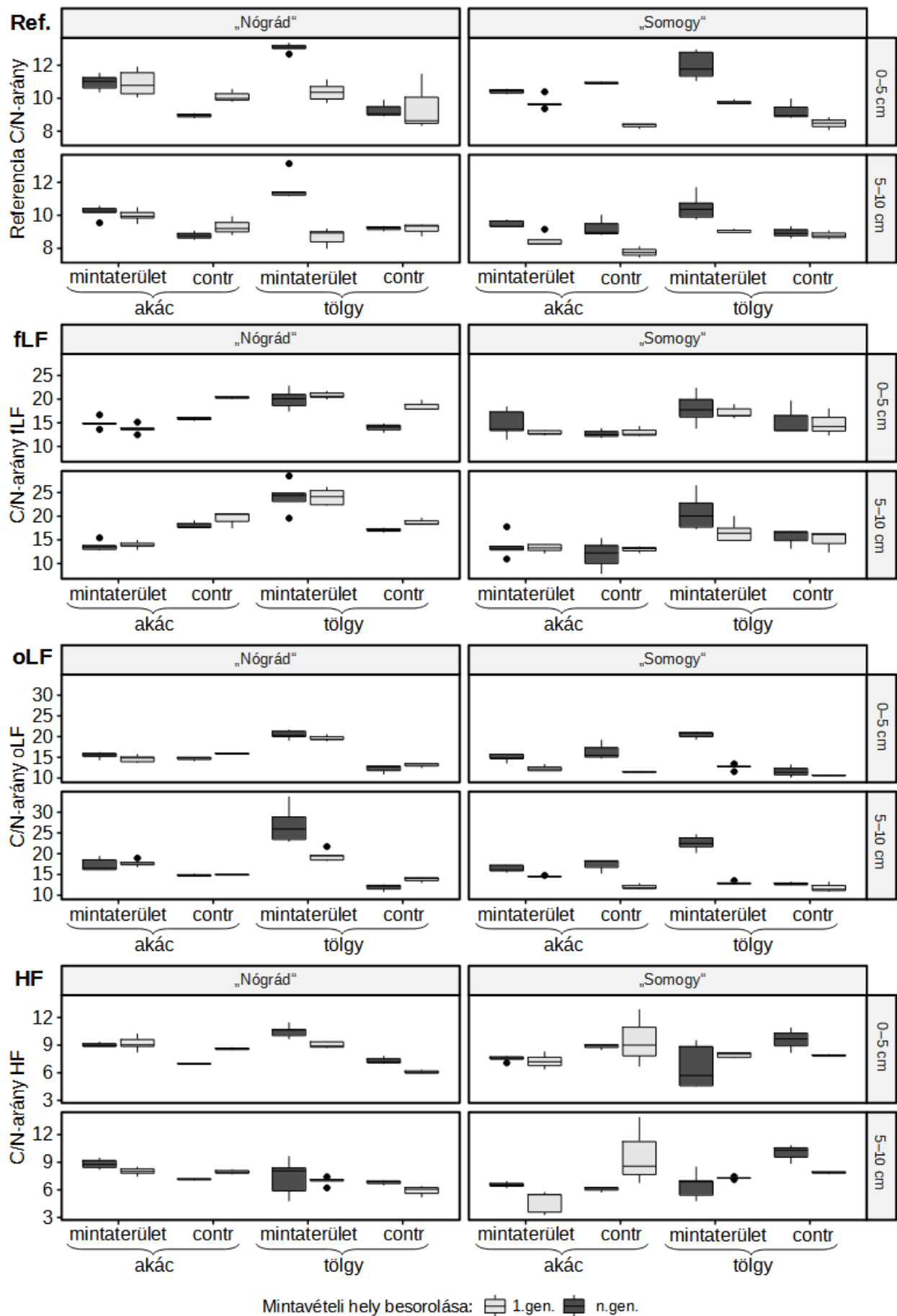
A szabad könnyű frakció (fLF) vonatkozásában számos szignifikáns eltérés adódott az 1. és az n. generációs állományok-, illetve a minta- és kontrollterületek között is. „Nógrádban” az 1. generációs akácos fLF-frakciójának C/N aránya szignifikánsan eltért a kontrollterületétől, illetve az 1. és az n. generációs tölgyesek ezen viszonyszámától is. Ugyanebben a régióban, ugyanerre a paraméterre az n. generációs akácos és az 1. és az n. generációs tölgyesek között is szignifikáns eltérés mutatkozott. „Somogyban” az fLF-C/N arány az 1. generációs akácos és az 1. és n. generációs tölgyesek között mutatott szignifikáns eltéréseket. Ezek alátámasztják a feltételezést, hogy a két faj egymáshoz, illetve a kontrollterületekhez viszonyítva is merőben más mikrobiális feltételeket teremt, amely visszatükröződik e magas mobilitású frakció összetevőinek eltérő komposztálódottsági fokán is.

A kötött könnyű frakció (oLF) vonatkozásában szintén több szignifikáns eltérés mutatkozott. „Nógrádban” ezen frakció C/N aránya szignifikánsan eltért az 1. generációs akácos és n. generációs tölgyes, 1. generációs tölgyes és kontrollterülete, illetve az n. generációs tölgyes és kontrollterülete viszonylatában is. „Somogyban” ugyanezt a paramétert tekintve szintén szignifikánsan eltért az 1. generációs akácos és az n. generációs tölgyes, 1. generációs akácos kontrollterülete és az n. generációs generációs akácos kontrollterülete, az 1. és n. generációs

tölgyesek, valamint az n. generációs tölgyes és kontrollterülete. Látható, hogy az eltérések az oLF-frakció viszonylatában már kevésbé a különböző fafajok és kontrollterületek között, hanem inkább az egyes fafajok eltérő generációjú állományai és kontrollterületeik között mutatkoztak. Ez különböző csoportok egybevetése esetén az oLF-frakció nagyobb (kémiai) homogenitására, ugyanakkor jelentősebb fajai befolyásokra enged következtetni.

A nehéz, kötött frakció (HF) C/N arányára vonatkozóan mindössze egyetlen szignifikáns eltérés adódott; a „somogyi” régióban, az n. generációs tölgyes és kontrollterülete között. Ebből az látszik, hogy a kötött frakcióban tárolt, a lebontottság magas fokán álló szerves anyag minőségi sajátosságai (legalábbis e két kémiai elem vonatkozásában) több különböző termőhely és vegetációtípus hatásaitól függetlenül hasonlóak.

Általánosságban az látszik, hogy a könnyű frakciókra a referencia C/N aránynál magasabb, de hasonló arányszámok adódtak, amely az alacsonyabb lebontottságú, „friss” elhalt szerves összetevők magasabb részarányát jelzi ezekben a frakciókban. Legalacsonyabb C/N arányú valamennyi esetben a mineralizálódás magas fokán álló nehéz frakció volt, amely arra utal, hogy ebben a frakcióban a szaprobioták számára alig/nem hozzáférhetően, hosszú távra raktározódik a szerves anyag. A C/N arányokat az egyes SOM frakciókban csökkenő sorrendbe állítva az 1. generációs állományok és a kontrollterületek zöménél (beleértve a n. generációs állományok kontrollterületeit is) a várakozásoknak megfelelő trendet kaptuk: fLF > oLF > referencia > HF. Kivétel a "somogyi" 1. generációs akácos mintaterület 5–10 cm-es szintje, kontrollterületének mindkét szintje (kiugrók), valamint a "nógrádi" 1. generációs akácos mintaterület mindkét szintje voltak, ahol az oLF-C/N arányok némileg magasabbak voltak a nekik megfelelő fLF-ek viszonyszámainál. A többedik generációs állományokban (mintaterületek) a sorrend a két könnyű SOM-frakció viszonylatában mindkét szintben kivétel nélkül fordítottan alakult: oLF > fLF > referencia > HF. (A kiugró "somogyi" értékek okán ez a sorrendiség az első generációs akácos kontrollterületén a referencia miatt megbomlik.) A jelenség a fás vegetációk hosszabb távon ható befolyását jelzi a helyi mikrobiális közösségekre, illetve ezen keresztül az elhalt szerves anyag komposztálódásának módjára.



20. ábra. A referencia C/N arány alakulása a minta- és kontrollterületeken (legfelül), illetve az egyes SOM-frakciókban (fLF, oLF és HF). Balról a "nógrádi", jobbról a "somogyi" adatok olvashatók le, világossal az 1., a sötéttel az n. generációs állományokra vonatkozóan a két szintben. (N=5 a mintaterületek, illetve N=3 kontrollterületek esetében).

## 5.8. Az aggregátumméret alakulása

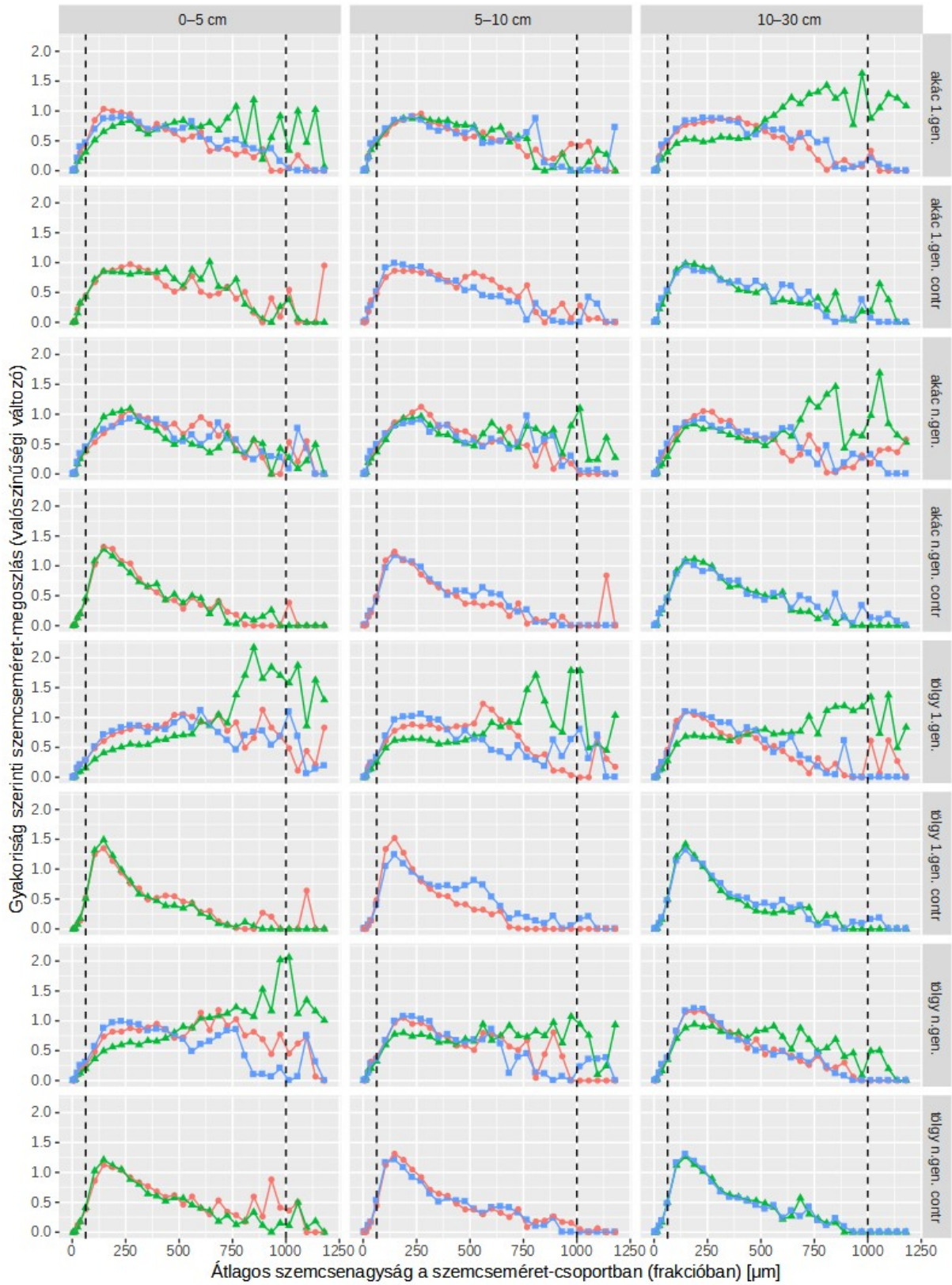
A digitális dinamikus képanalízissel nyert adatokat a SOM-frakcionáláshoz hasonló összehasonlításban régióként, fafajonként és mélységi szintenként külön vizsgáltuk. (A legfontosabb nyers adatok a Függelék F9. a-b. táblázataiban vannak összefoglalva.) Az aggregált szemcsék gyakoriság szerinti méretmegoszlását sűrűségfüggvényekkel ábrázolva az egyes helyszínekhez kapcsolódó sorozatmérések jelentősebb heterogenitást mutattak (21. a-b. ábra). Az ábrákon függőleges szaggatott vonalakkal a nedves szitálással „leszűkített” 63–1000  $\mu\text{m}$  közötti mérettartományt jelöltük, amely egyúttal vizsgálataink fókuszát is képezte.

A tölgy és akác fajokkal erdősített mintaterületeknél az egy-egy mintához tartozó sorozatmérések szemcseméret-megoszlásai nagyobb varianciát mutattak, mint a fátlan kontrollterületek mintái, amely alapvetően a fafaji befolyásra utal. A görbékét áttekintve szintén látható, hogy jelentősebb eltérések inkább a nagyobb méretcsoportok ( $> 500 \mu\text{m}$ ) esetében mutatkoznak. A leggyakoribb aggregált szemcseméret „Somogyban” valamennyi szintet és mintavételi helyszínt tekintve 125  $\mu\text{m}$  körül volt, ugyanakkor a „nógrádi” régióban lényegesen változatosabb megoszlást tapasztaltunk, amelyek súlypontja, vagy súlypontjai inkább 150–200  $\mu\text{m}$  közötti (egyes esetekben ennél nagyobb) tartományba estek. „Nógrádban” a minta- és kontrollterületek szemcseméret-megoszlásai között valamennyi fafaj tekintetében szembetűnőbbek voltak a különbségek, mint „Somogyban”. Egyértelmű mintázatot azonban fajok vagy szintek között egyik régióban sem sikerült azonosítani. Megjegyzendő, hogy a primer ásványi szemcsék méretmegoszlása a két régióban eltérő volt; a „nógrádi” helyszíneket a „somogyihoz” hasonlítva a homok magasabb részarányát láthattuk (ld. textúraadatok: 18. ábra; illetve az optikai elvű mérés eredményei: Függelék, f3. ábra) amely adatokkal ugyanakkor nem magyarázható kizárólagosan az aggregátumok kisebb vagy nagyobb mérete.



„Nógrád“

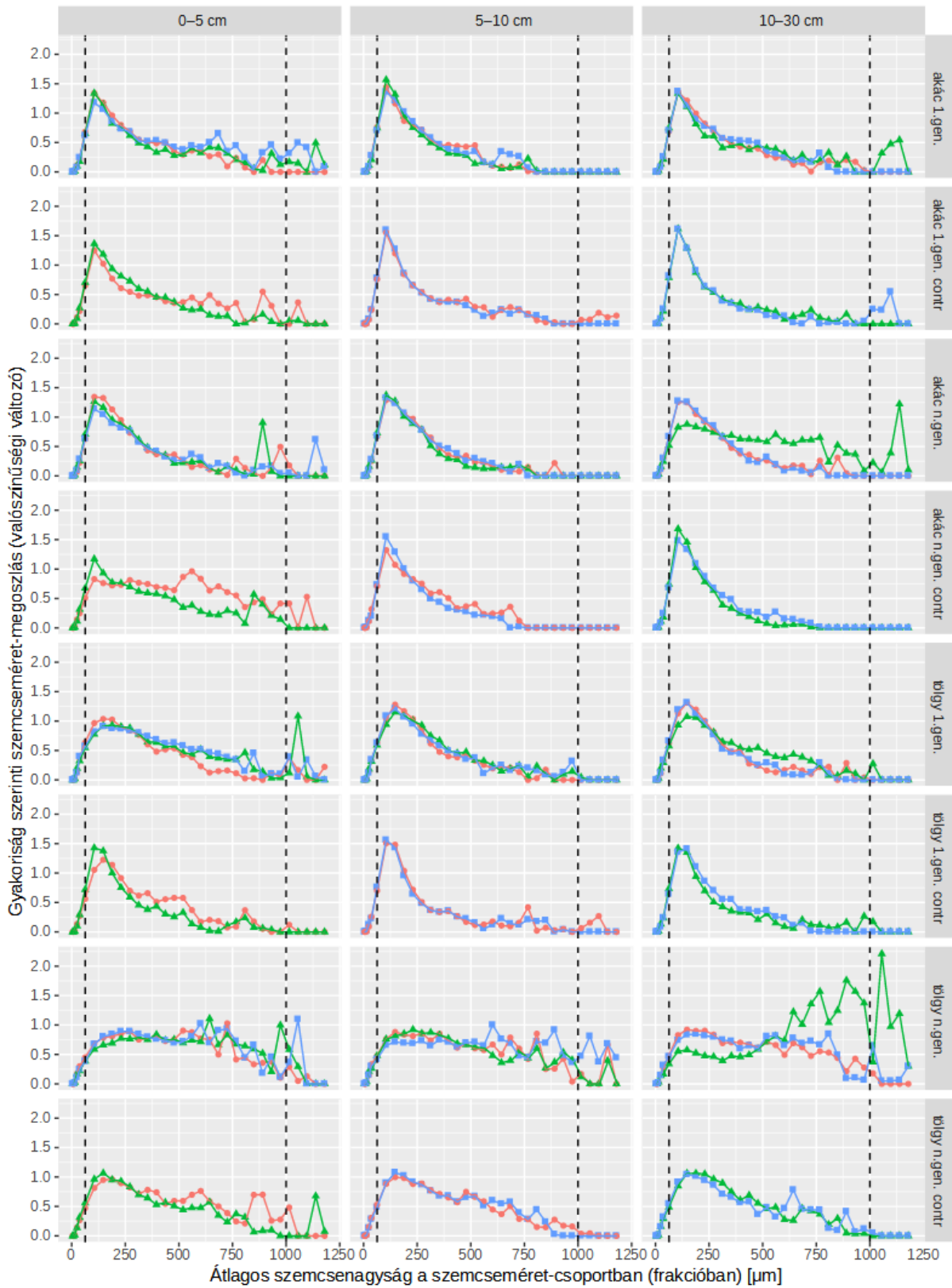
Ismétlések (sorozatmérés) 1 2 3



21. a. ábra. A gyakoriság szerinti szemcseméret-megoszlások valamennyi minta- (N=3) és kontrollterületen (N=2) a "nógrádi" régióban. A szaggatott függőleges vonalak a nedves szitálással kialakított frakcióhatárokat jelölik.

„Somogy“

Ismétlések (sorozatmérés) 1 2 3



21. b. ábra. A gyakoriság szerinti szemcseméret-megoszlások valamennyi minta- (N=3) és kontrollterületen (N=2) a "somogyi" régióban. A szaggatott függőleges vonalak a nedves szitálással kialakított frakcióhatárokat jelölik.

Ezt követően az egyes helyszínek között a  $D_5$ ,  $D_{25}$ ,  $D_{50}$ ,  $D_{75}$  és  $D_{95}$  kvantilisekkel definiált méretosztályokban, illetve a térfogattal súlyozott átlagos szemcseátmérőben (*VMD*) megfigyelhető különbségeket vetettük egybe, régióként. Ehhez az egy-egy helyszínhez tartozó sorozatmérések és szintek (0–30 cm) méretmegoszlási adataiból átlagokat képeztünk (7. a-b. táblázat). Mivel a méretadattal együtt növekvő szórás értékből az egyes méretcsoportokban fellépő variabilitás nem látszik jól, kiszámoltuk a csoporton belüli (*CV*) és azok közötti, adott régióra vonatkoztatott ( $CV_{össz}$ ) varianciát is. A variációs együtthatók minta- és kontrollterületek-, illetve fajok közötti összevetése lehetővé tette az egyes fajok aggregátumméretre gyakorolt hatásának kimutatását: az eltérések az akác, illetve a tölgy fajok befolyására utalnak.

A „nógrádi” régióban a 95%-hoz tartozó kvantilisek ( $D_{95}$ ) összehasonlítása alapján látható, hogy a legnagyobb méretű aggregátumok a tölgy mintaterületek esetében voltak azonosíthatóak. A sorrend a következőképpen alakult: 1. generációs tölgy > n. generációs tölgy > n. generációs akác > 1. generációs akác > 1. generációs akác contr > n. generációs tölgy contr > n. generációs akác contr > 1. generációs tölgy contr. Majdnem ugyanez a sorrendiség adódott a *VMD*-k sorrendbe állításával is; bár így az 1. és n. generációs akác állományok esetében helycsere volt, máskülönben egyezett. A legkisebb szemcseméret-csoportot ( $D_5$ ) leszámítva valamennyi kvantilisnél nagyobb átlagos szemcseátmérők és variációs együtthatók adódtak a faji befolyással érintett mintaterületeken, mint a hozzájuk tartozó kontrollterületeken. A  $D_5$  kvantilisnél ugyanakkor az 1. generációs akác és kontrollterületét kivéve a mintaterületeken a kontrollterületeknél kisebb átlagos szemcseméretet adódtak. A variációs együtthatók ugyanakkor ebben a kvantilisben is a mintaterületek esetében voltak nagyobbak. Mindez az akác és tölgy fajok egyértelmű befolyását igazolja a fás vegetációval nem érintett kontrollterületekhez képest a „nógrádi” régióban; ugyanakkor az is látható, hogy a hatás a nagyobb mérettartományok esetében kifejezettebb.

A „somogyi” régióban a „nógrádinál” kevésbé egyértelmű trendek rajzolódtak ki. A fenti analógiára, a legnagyobb- és átlagos szemcseátmérők alapján felállított sorrendiség négy esetben is különbözött. A 95%-hoz tartozó kvantilisek alapján az n. generációs tölgy > n. generációs tölgy contr > 1. generációs akác contr > n. generációs akác > 1. generációs akác > 1. generációs tölgy > n. generációs akác contr > 1. generációs tölgy contr sorrend adódott. A *VMD* szerint a helyszíneket csökkenő sorrendbe állítva pedig az n. generációs tölgy > n. generációs tölgy contr > 1. generációs tölgy > n. generációs akác > 1. generációs akác > n. generációs akác contr > 1. generációs akác contr > 1. generációs tölgy contr sorrendet kaptuk. Ebben a régióban az akác faj esetében a kontrollterületek átlagos szemcsenagyságai több esetben (több kvantilisnél) felülmúlták a hozzájuk tartozó mintaterületen mértet; illetve ugyanez a variációs

„Nógrád”	$D_5$	$D_{25}$	$D_{50}$	$D_{75}$	$D_{95}$	VMD
<b>1. gen. akác</b>						
$\bar{x}$ [ $\mu\text{m}$ ]	31,57	95,97	216,79	427,37	827,32	297,78
$\sigma$ [ $\mu\text{m}$ ]	2,33	18,58	68,36	140,22	169,45	77,20
CV	0,07	0,19	0,32	0,33	0,20	0,26
$CV_{\text{össz}}$	0,44	0,83	0,84	0,84	0,81	0,86
<b>1. gen. akác contr.</b>						
$\bar{x}$ [ $\mu\text{m}$ ]	31,03	89,33	176,74	338,25	702,92	247,18
$\sigma$ [ $\mu\text{m}$ ]	1,96	6,23	16,66	37,52	53,42	19,78
CV	0,06	0,07	0,09	0,11	0,08	0,08
$CV_{\text{össz}}$	0,38	0,30	0,25	0,29	0,30	0,26
<b>n. gen. akác</b>						
$\bar{x}$ [ $\mu\text{m}$ ]	32,87	102,92	211,86	417,33	850,27	295,98
$\sigma$ [ $\mu\text{m}$ ]	2,88	14,15	28,12	97,39	119,37	44,11
CV	0,09	0,14	0,13	0,23	0,14	0,15
$CV_{\text{össz}}$	0,53	0,59	0,36	0,60	0,56	0,49
<b>n. gen. akác contr.</b>						
$\bar{x}$ [ $\mu\text{m}$ ]	35,78	97,22	163,81	281,07	601,96	218,30
$\sigma$ [ $\mu\text{m}$ ]	3,10	2,97	4,42	17,02	47,39	10,18
CV	0,09	0,03	0,03	0,06	0,08	0,05
$CV_{\text{össz}}$	0,52	0,13	0,07	0,16	0,31	0,15
<b>1. gen. tölgy</b>						
$\bar{x}$ [ $\mu\text{m}$ ]	39,68	136,46	297,14	556,37	953,40	376,49
$\sigma$ [ $\mu\text{m}$ ]	5,91	37,10	121,57	198,87	233,38	116,04
CV	0,15	0,27	0,41	0,36	0,24	0,31
$CV_{\text{össz}}$	0,90	1,16	1,10	0,92	0,97	1,02
<b>1. gen. tölgy contr.</b>						
$\bar{x}$ [ $\mu\text{m}$ ]	46,78	100,81	156,65	259,73	554,35	209,20
$\sigma$ [ $\mu\text{m}$ ]	2,05	4,27	10,35	34,82	63,07	25,51
CV	0,04	0,04	0,07	0,13	0,11	0,12
$CV_{\text{össz}}$	0,26	0,18	0,18	0,34	0,45	0,40
<b>n. gen. tölgy</b>						
$\bar{x}$ [ $\mu\text{m}$ ]	38,76	125,91	249,80	469,60	873,29	330,15
$\sigma$ [ $\mu\text{m}$ ]	3,84	25,15	83,43	156,70	180,90	86,00
CV	0,10	0,20	0,33	0,33	0,21	0,26
$CV_{\text{össz}}$	0,60	0,85	0,89	0,86	0,82	0,86
<b>n. gen. tölgy contr.</b>						
$\bar{x}$ [ $\mu\text{m}$ ]	43,98	102,56	166,75	288,66	672,19	233,80
$\sigma$ [ $\mu\text{m}$ ]	1,20	4,88	12,14	29,92	99,21	23,08
CV	0,03	0,05	0,07	0,10	0,15	0,10
$CV_{\text{össz}}$	0,16	0,20	0,19	0,27	0,59	0,33

7. a. táblázat. Az aggregált szemcsenagyság-átlagok, szórás, csoporton belüli- és csoportok közötti variációs együttható a „nógrádi” régióban, a 0–30 cm-es szintben, a  $D_5$ ,  $D_{25}$ ,  $D_{50}$ ,  $D_{75}$ , valamint a  $D_{95}$  kivételiseknél; illetve a VMD.

<b>„Somogy”</b>	$D_5$	$D_{25}$	$D_{50}$	$D_{75}$	$D_{95}$	$VMD$
<b>1. gen. akác</b>						
$\bar{x}$ [ $\mu\text{m}$ ]	40,43	84,32	131,24	233,89	590,91	195,08
$\sigma$ [ $\mu\text{m}$ ]	1,61	3,12	7,85	29,30	167,36	31,24
$CV$	0,04	0,04	0,06	0,13	0,28	0,16
$CV_{\text{össz}}$	0,50	0,36	0,21	0,33	0,80	0,55
<b>1. gen. akác contr.</b>						
$\bar{x}$ [ $\mu\text{m}$ ]	40,81	82,03	124,85	216,29	610,86	189,44
$\sigma$ [ $\mu\text{m}$ ]	0,93	2,61	8,12	43,18	302,82	44,20
$CV$	0,02	0,03	0,07	0,20	0,50	0,23
$CV_{\text{össz}}$	0,29	0,31	0,22	0,52	1,40	0,81
<b>n. gen. akác</b>						
$\bar{x}$ [ $\mu\text{m}$ ]	37,68	84,87	139,29	244,49	606,00	199,17
$\sigma$ [ $\mu\text{m}$ ]	2,48	4,27	16,51	56,87	304,04	47,67
$CV$	0,07	0,05	0,12	0,23	0,50	0,24
$CV_{\text{össz}}$	0,82	0,49	0,41	0,61	1,42	0,83
<b>n. gen. akác contr.</b>						
$\bar{x}$ [ $\mu\text{m}$ ]	39,03	85,02	139,08	252,26	541,21	194,54
$\sigma$ [ $\mu\text{m}$ ]	2,24	5,10	27,12	84,45	187,78	51,20
$CV$	0,06	0,06	0,20	0,33	0,35	0,26
$CV_{\text{össz}}$	0,72	0,59	0,67	0,87	0,98	0,91
<b>1. gen. tölgy</b>						
$\bar{x}$ [ $\mu\text{m}$ ]	34,61	83,51	150,21	262,65	575,50	206,24
$\sigma$ [ $\mu\text{m}$ ]	1,98	1,28	11,25	38,78	109,95	28,20
$CV$	0,06	0,02	0,07	0,15	0,19	0,14
$CV_{\text{össz}}$	0,72	0,15	0,26	0,39	0,54	0,47
<b>1. gen. tölgy contr.</b>						
$\bar{x}$ [ $\mu\text{m}$ ]	39,11	84,25	130,32	207,29	484,12	178,75
$\sigma$ [ $\mu\text{m}$ ]	1,53	3,68	10,56	24,99	52,46	18,82
$CV$	0,04	0,04	0,08	0,12	0,11	0,11
$CV_{\text{össz}}$	0,49	0,43	0,28	0,31	0,31	0,36
<b>n. gen. tölgy</b>						
$\bar{x}$ [ $\mu\text{m}$ ]	35,08	103,88	232,38	475,71	886,89	324,37
$\sigma$ [ $\mu\text{m}$ ]	2,39	10,63	63,36	125,46	138,94	67,84
$CV$	0,07	0,10	0,27	0,26	0,16	0,21
$CV_{\text{össz}}$	0,85	1,01	0,94	0,69	0,44	0,72
<b>n. gen. tölgy contr.</b>						
$\bar{x}$ [ $\mu\text{m}$ ]	35,54	92,55	168,48	313,00	677,24	235,28
$\sigma$ [ $\mu\text{m}$ ]	0,76	3,77	8,75	25,49	58,38	14,36
$CV$	0,02	0,04	0,05	0,08	0,09	0,06
$CV_{\text{össz}}$	0,27	0,40	0,18	0,21	0,24	0,21

7. b. táblázat. Az aggregált szemcsenagyság-átlagok, szórás, csoporton belüli- és csoportok közötti variációs együttható a „somogyi” régióban, a 0–30 cm-es szintben, a  $D_5$ ,  $D_{25}$ ,  $D_{50}$ ,  $D_{75}$ , valamint a  $D_{95}$  kivintiliseknél; illetve a  $VMD$ .

együtthathók (többnyire) magasabb arányszámában is megmutatkozott. (Legszembetűnőbb a jelenség az n. generációs akác és kontrollterülete esetében.) A tölgyek befolyása viszont itt is egyértelműen megmutatkozott mind az átlagos aggregátumméret, mind a variációs együtthathók számadataiban is. Esetükben csupán három kivétel adódott alacsonyabb szemcseátmérőknél, vagyis ahol a kontrollterület átlagos szemcsemérete (csekély mértékben) megelőzte a mintaterületét. Ilyen volt a  $D_5$  és  $D_{25}$  kvantilisok esetében az 1. generációs tölgyesnél, valamint a  $D_5$  kvantilis esetében az n. generációs tölgyesnél. Összefoglalva a „somogyi” régióban a tölgy fafaj egyértelmű, míg az akác gyenge befolyását tudtuk igazolni az aggregátumméretre, ugyanakkor leginkább itt is a nagyobb szemcseméret-tartományokban volt kifejezett a hatás.

A két régiót együtt tekintve az is látható, hogy a fafajok (mindenekelőtt a tölgy) hatására kisebb („kiindulási”) aggregátumnagyságok mellett is kialakulhatnak nagy méretű aggregátumok; jól példázza ezt a „Nógrádban” legnagyobb aggregátumméreteket felmutató 1. generációs tölgyes, amelyhez tartozó kontrollterületen ugyanakkor a sorban (régióban) legkisebb aggregátum-átmérőket azonosítottuk a  $D_{95}$ -ös kvantilisban.

A szemcseméret-megoszlások grafikus tanulmányozására, vagy egybevetésére a Függelék f2. a-b. ábrái adnak lehetőséget aggregált (majd ultrahanggal kezelt) minták esetében; illetve a Függelék f3. ábrája az elsődleges ásványi talajösszetevők esetében.

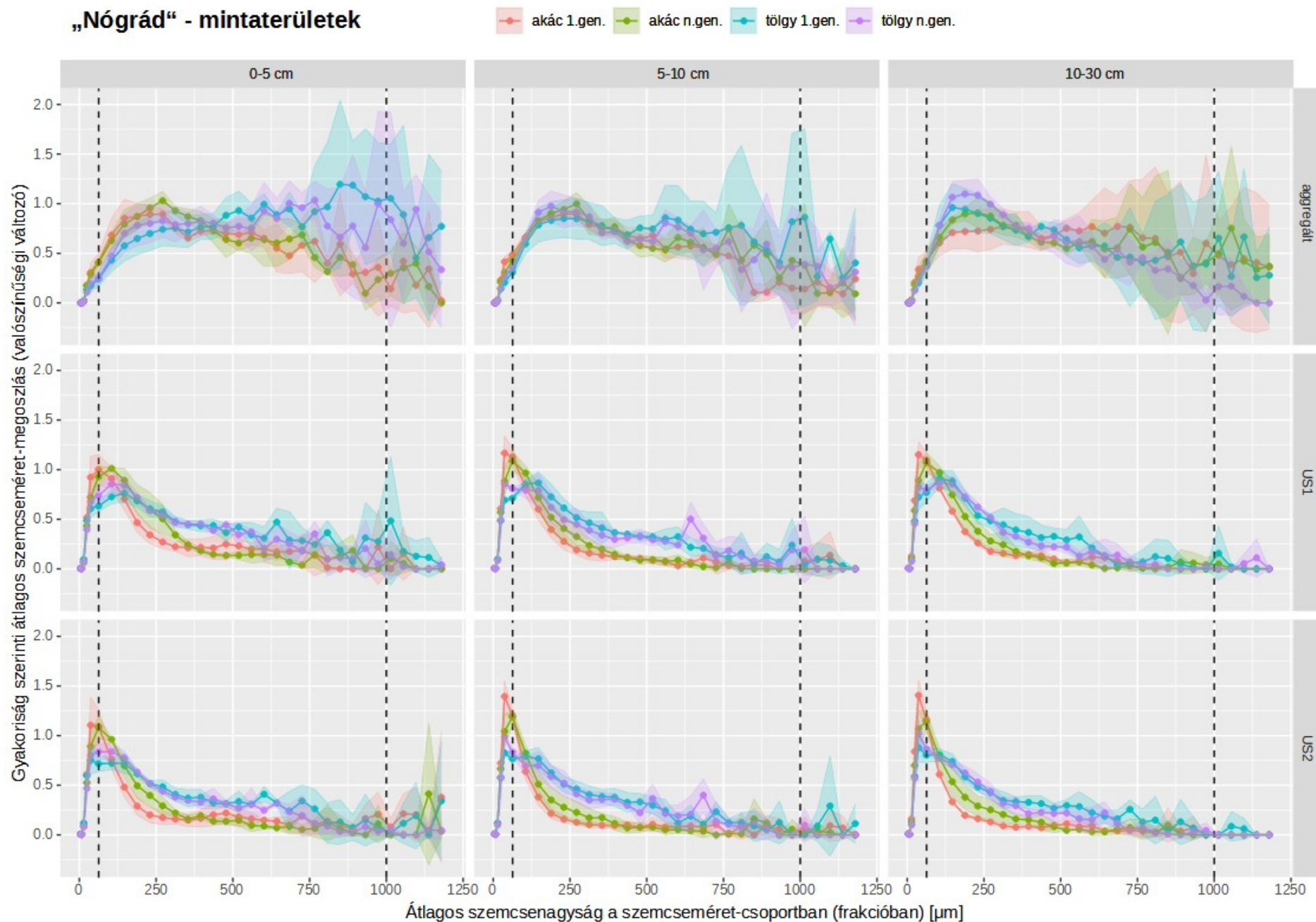
### **5.9. Az aggregátumstabilitás alakulása**

Az aggregátumstabilitást az energiaközlést követő méretváltozás alapján tanulmányoztuk. A szemcsék gyakoriság szerinti méretmegoszlásának sűrűségfüggvényeken való ábrázolásához az egyes sorozatméréseket átlagoltuk, és feltüntettük a szórást is (22. a-c. ábra). Az egyes fafajok szemcseméret-csoportokhoz tartozó átlagértékei a grafikonokon egymáshoz közel futnak, a fajtai különbségek inkább a nagyobb szemcseméret-tartományoknál mutatkoztak. A kontrollterületeknél ugyanakkor a szórás a szemcseméret-megoszlás szélesebb tartományában, nagyjából hasonló mértékben mutatkozott („kiegyenlítettebb” volt). Az első ultrahangos kezelés (US1) valamennyi helyszín esetében jelentős változást okozott a méretmegoszlásban: számottevően megnövekedett a szemcsék száma a kisebb mérettartományok szemcse-csoportjaiban. A második energiaközlés (US2) után érzékelhető különbségek az US1 utáni állapothoz viszonyítva kisebbek voltak, amely általánosságban kevésbé stabil aggregátumok jelenlétére utal (hiszen döntő többségük már az első energiaközlés után szétesett, és tovább alig darabolódott); ugyanakkor az egyes fafajok és kontrollterületeik viszonylatában azért itt is adódtak különbségek. Szintén általános jelenség, hogy az energiaközlést követően a szórás (leginkább az aggregált minták szórásához viszonyítva, vagyis az US1-et követően) a csoportos átlagérték közelébe süllyedt, ami azt jelzi, hogy az egyes fafajok, illetve helyszínek közötti

aggregátumnagyságok egyre jobban hasonlítottak egymásra az ultrahangos kezelést követően. A „nógrádi” régió mintaterületein a „somogyinál” jelentősebb mértékű szórás a fajok kifejezettebb hatására engedett következtetni. A két régió viszonylatában ugyanakkor ezzel épp ellentétes megfigyelést tehetünk a szórásra a kontrollterületek esetében: a „somogyi” régióban tapasztalt jelentősebb szórás ezen területek eleve nagyobb heterogenitására utalhat, a kiindulási aggregátumméret tekintetében. A grafikonok alapján egyértelmű mintázatot fajok vagy szintek között itt sem tudunk azonosítani, egyik régióban sem. Az ábrákat tanulmányozva viszont szembetűnhet a jelenség, hogy néhány esetben egy-egy ultrahangos kezelés nyomán nagyobb részecskék jelentek meg, mint amilyeneket az első ultrahang-szint után mértünk. Ezek magyarázatára három elmélet is van: (1) azok keletkeztek kevés számú, a beállított 5%-os küszöbön kívül eső, nagy méretű részecskék több kisebb darabra eséséből az ultrahangos kezelés következtében, immár a mérési tartományba esve; illetve (2) az ultrahang hatására egyes (szerves) összetevők koagulálhatnak, ami méretnövekedéssel járhat. (3) Úgyszintén előfordul, hogy a roncsolás hatására a szemcsék olyan apró darabokra hullanak szét, amelyek kívül esnek a mérőeszköz alsó mérési tartományán, ami eredményeképp a detektált részecskék méretmegoszlása némileg eltolódik (torzul).



## „Nógrád“ - mintaterületek

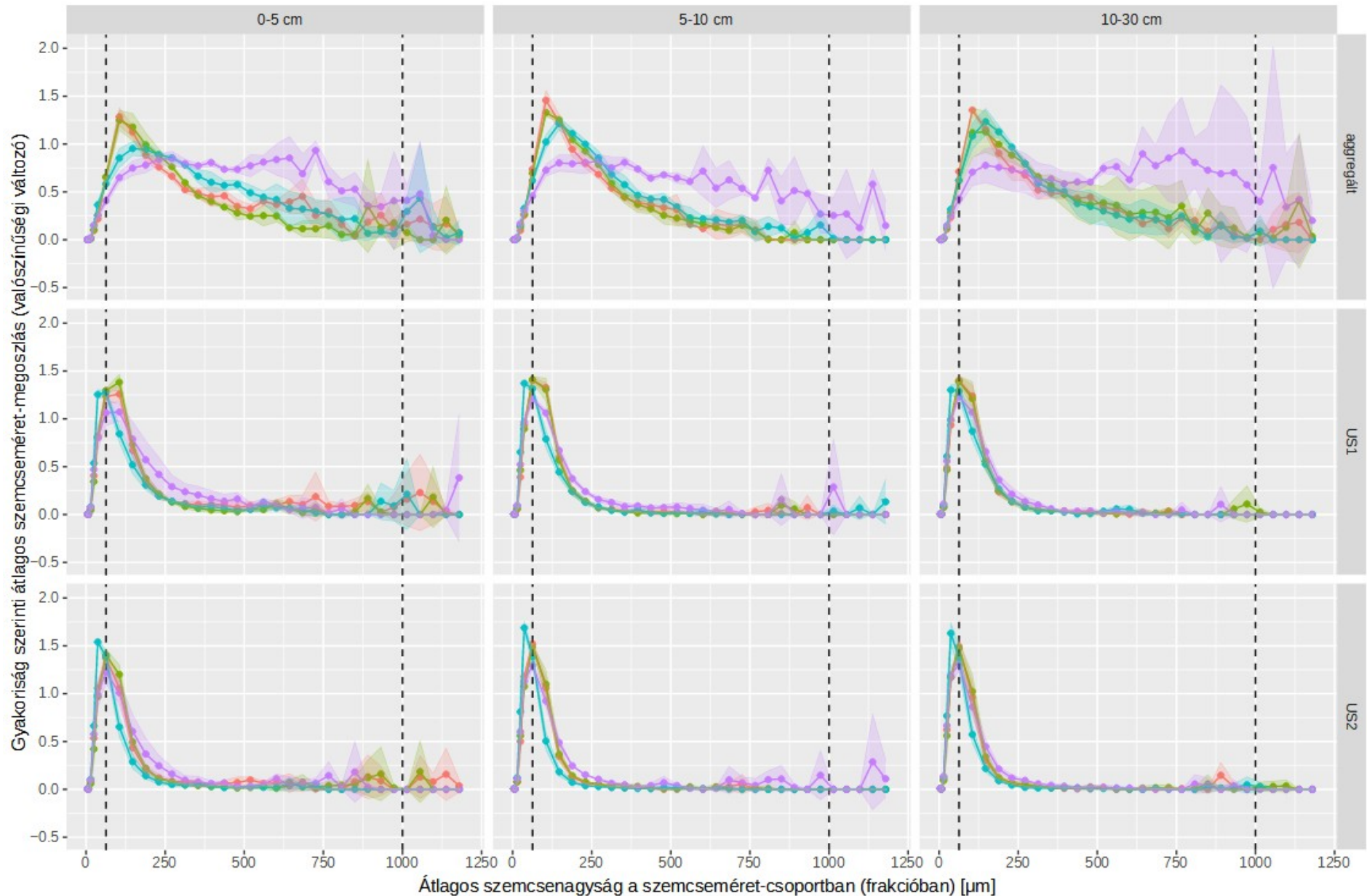


22. a. ábra. A gyakoriság szerinti szemcse méret-megoszlás a "nógrádi" régió mintaterületein (N=3), az aggregált minták esetében, illetve az ultrahangos energiaközlések (US1, US2) követően. A szaggatott függőleges vonalak a nedves szítással kialakított frakcióhatárokat jelölik.



# „Somogy“ - mintaterületek

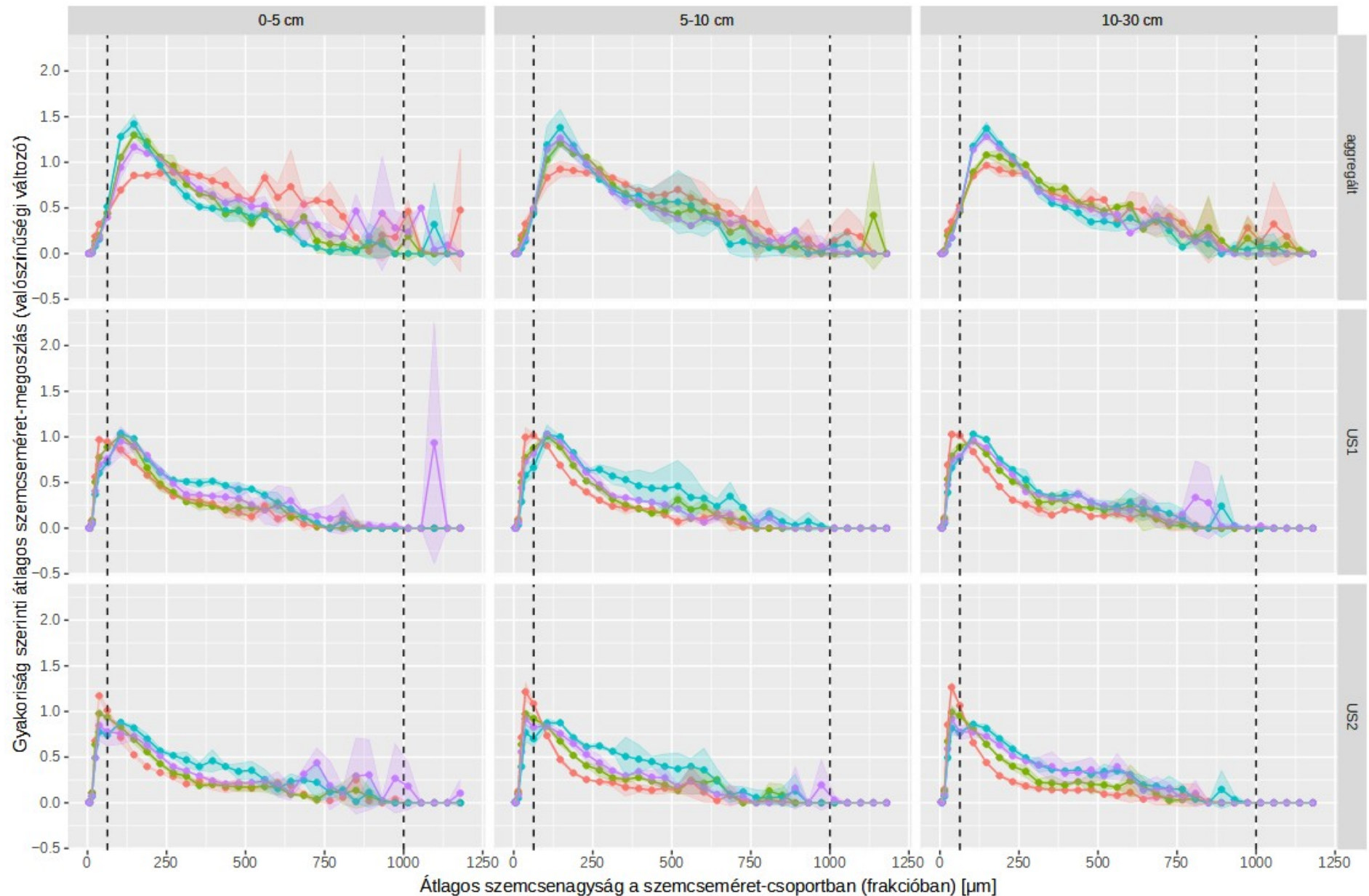
akác 1.gen. akác n.gen. tölgy 1.gen. tölgy n.gen.



22. b. ábra. A gyakoriság szerinti szemcseméret-megoszlás a "somogyi" régió mintaterületein (N=3), az aggregált minták esetében, illetve az ultrahangos energiaközléseket (US1, US2) követően. A szaggatott függőleges vonalak a nedves szitálással kialakított frakcióhatárokat jelölik.

## „Nógrád“ - kontrollterületek

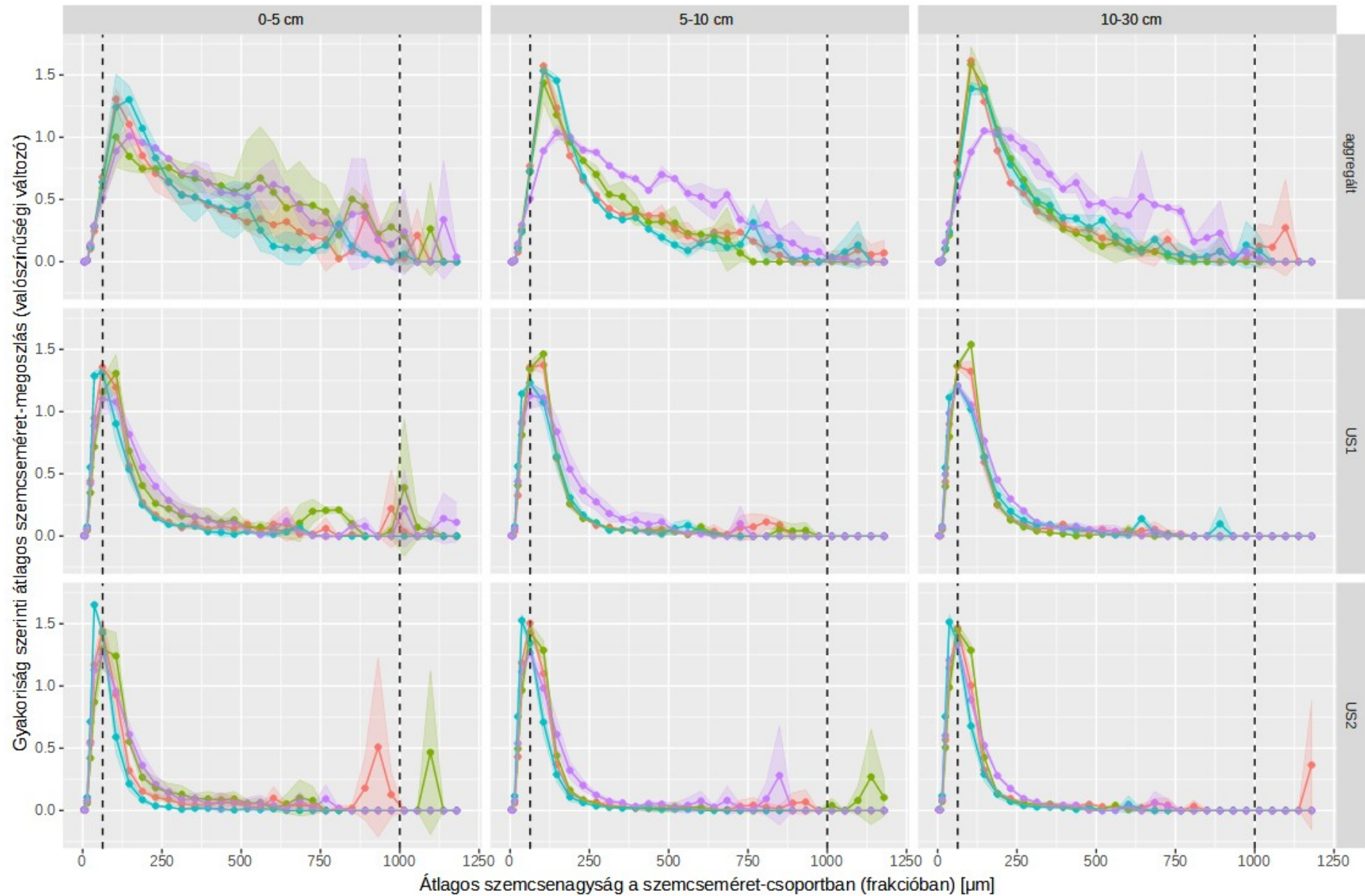
akác 1.g. contr   akác n.g. contr   tölgy 1.g. contr   tölgy n.g. contr



22. c. ábra. A gyakoriság szerinti szemcseméret-megoszlás a "nógrádi" régió kontrollterületein (N=2), az aggregált minták esetében, illetve az ultrahangos energiaközléseket (US1, US2) követően. A szaggatott függőleges vonalak a nedves szitálással kialakított frakcióhatárokat jelölik.

## „Somogy“ - kontrollterületek

akác 1.g. contr   akác n.g. contr   tölgy 1.g. contr   tölgy n.g. contr



22. d. ábra. A gyakoriság szerinti szemcseméret-megoszlás a "somogyi" régió kontrollterületein (N=2), az aggregált minták esetében, illetve az ultrahangos energiaközléseket (US1, US2) követően. A szaggatott függőleges vonalak a nedves szitálással kialakított frakcióhatárokat jelölik.

A grafikonok alapján felvázolt jelenségek a  $D_5$ ,  $D_{25}$ ,  $D_{50}$ ,  $D_{75}$  és  $D_{95}$  kvintiliseknél mutatkozó méretváltozásokban is megfigyelhetőek (8. a-b. táblázat). Az abszolút méretkülönbségeket tekintve, az aggregált és (első) ultrahangos kezelésen túlesett szemcsék között (7. a-b. és 8. a-b. táblázatok) az egyes kvantilisekhez rendelhetően a két régióban arányaiban hasonló különbségek mutatkoztak. A kisebb méretcsoportok mintáinál ugyanakkor – a fafajtól, illetve a helytől többé-kevésbé függetlenül – arányaiban kisebb méretcsökkenések is adódtak az energiabevitel hatására. Kivétel a „nógrádi” 1. generációs tölgyes kontrollterülete volt, ahol valamennyi átmérőcsoportban (kvintilisnél) megközelítőleg hasonló mértékű méretcsökkenés volt látható az 1. ultrahangos kezelést követően. (A 2. kezelés után a méretdifferenciák már kevésbé voltak egyöntetűek.) Ebben a kivételes esetben tehát a nagyobb aggregátumok magasabb stabilitása igazolódott; megjegyzendő ugyanakkor, hogy ezen a helyszínen mértük ebben a régióban (is) a legkisebb aggregátumméreteket. Vagyis összességében az ismert fordított arányosság (növekvő aggregátummérettel csökkenő stabilitás) látszott igazolódni.

„Nógrád”	$D_5$	$D_{25}$	$D_{50}$	$D_{75}$	$D_{95}$	VMD
<b>1. gen. akác</b>						
$\Delta 1$ [ $\mu\text{m}$ ]	-9,95	-56,87	-147,79	-304,65	-462,17	-185,02
$\Delta 2$ [ $\mu\text{m}$ ]	-1,07	-3,49	-10,66	-21,70	49,44	-3,42
<b>1. gen. akác contr.</b>						
$\Delta 1$ [ $\mu\text{m}$ ]	-9,37	-50,04	-104,75	-206,97	-344,41	-136,84
$\Delta 2$ [ $\mu\text{m}$ ]	-1,09	-4,02	-11,75	-24,04	-12,05	-11,27
<b>n. gen. akác</b>						
$\Delta 1$ [ $\mu\text{m}$ ]	-10,55	-58,89	-132,41	-278,96	-524,45	-182,34
$\Delta 2$ [ $\mu\text{m}$ ]	-1,05	-4,90	-11,37	-22,20	-1,75	-7,87
<b>n. gen. akác contr.</b>						
$\Delta 1$ [ $\mu\text{m}$ ]	-13,30	-52,66	-77,99	-124,05	-194,99	-91,25
$\Delta 2$ [ $\mu\text{m}$ ]	-1,30	-5,91	-13,36	-18,83	-0,33	-9,61
<b>1. gen. tölgy</b>						
$\Delta 1$ [ $\mu\text{m}$ ]	-17,18	-87,65	-190,02	-330,34	-296,26	-191,87
$\Delta 2$ [ $\mu\text{m}$ ]	-1,26	-7,37	-18,60	-32,63	-69,48	-24,54
<b>1. gen. tölgy contr.</b>						
$\Delta 1$ [ $\mu\text{m}$ ]	-20,79	-42,16	-43,25	-49,78	-51,46	-45,01
$\Delta 2$ [ $\mu\text{m}$ ]	-2,21	-11,39	-12,85	-7,77	3,76	-7,66
<b>n. gen. tölgy</b>						
$\Delta 1$ [ $\mu\text{m}$ ]	-15,13	-78,72	-152,54	-271,29	-224,58	-161,36
$\Delta 2$ [ $\mu\text{m}$ ]	-1,29	-5,64	-15,71	-26,97	-143,82	-24,69
<b>n. gen. tölgy contr.</b>						
$\Delta 1$ [ $\mu\text{m}$ ]	-20,14	-53,18	-67,35	-104,58	-177,48	-82,74
$\Delta 2$ [ $\mu\text{m}$ ]	-1,49	-7,25	-12,14	4,42	141,54	14,06

8. a. táblázat. Az aggregátum- illetve szemcsenagyság változások a  $D_5$ ,  $D_{25}$ ,  $D_{50}$ ,  $D_{75}$ , valamint a  $D_{95}$  kvintiliseknél, illetve a VMD esetében, a „nógrádi” régióban, az első- ( $\Delta 1$ ), majd a második ultrahangos kezelést ( $\Delta 2$ ) követően.



„Somogy”	$D_5$	$D_{25}$	$D_{50}$	$D_{75}$	$D_{95}$	VMD
<b>1. gen. akác</b>						
$\Delta 1$ [ $\mu\text{m}$ ]	-16,00	-39,48	-59,26	-125,57	-338,17	-100,49
$\Delta 2$ [ $\mu\text{m}$ ]	-1,79	-5,50	-9,55	-18,18	-75,03	-15,44
<b>1. gen. akác contr.</b>						
$\Delta 1$ [ $\mu\text{m}$ ]	-15,85	-36,93	-52,97	-108,44	-396,75	-94,01
$\Delta 2$ [ $\mu\text{m}$ ]	-1,88	-5,28	-9,11	-18,07	-3,50	-11,52
<b>n. gen. akác</b>						
$\Delta 1$ [ $\mu\text{m}$ ]	-13,00	-39,77	-67,63	-137,88	-413,21	-110,24
$\Delta 2$ [ $\mu\text{m}$ ]	-1,43	-4,30	-7,01	-12,97	63,15	-2,68
<b>n. gen. akác contr.</b>						
$\Delta 1$ [ $\mu\text{m}$ ]	-13,84	-36,69	-62,10	-136,09	-195,62	-85,22
$\Delta 2$ [ $\mu\text{m}$ ]	-1,59	-5,28	-7,78	-13,19	-85,14	-14,03
<b>1. gen. tölgy</b>						
$\Delta 1$ [ $\mu\text{m}$ ]	-12,31	-46,04	-90,20	-170,39	-379,08	-124,98
$\Delta 2$ [ $\mu\text{m}$ ]	-1,40	-3,34	-10,47	-16,44	-63,24	-18,49
<b>1. gen. tölgy contr.</b>						
$\Delta 1$ [ $\mu\text{m}$ ]	-16,41	-45,08	-65,58	-106,01	-281,59	-91,89
$\Delta 2$ [ $\mu\text{m}$ ]	-1,62	-4,73	-13,89	-23,69	-67,96	-24,42
<b>n. gen. tölgy</b>						
$\Delta 1$ [ $\mu\text{m}$ ]	-12,71	-61,55	-159,49	-357,11	-619,52	-223,65
$\Delta 2$ [ $\mu\text{m}$ ]	-1,19	-4,21	-9,48	-20,60	-48,52	-9,36
<b>n. gen. tölgy contr.</b>						
$\Delta 1$ [ $\mu\text{m}$ ]	-11,78	-48,39	-92,91	-188,11	-409,89	-132,72
$\Delta 2$ [ $\mu\text{m}$ ]	-1,38	-4,85	-10,92	-23,87	-55,82	-17,14

8. b. táblázat. Az aggregátum- illetve szemcsenagyság változások a  $D_5$ ,  $D_{25}$ ,  $D_{50}$ ,  $D_{75}$ , valamint a  $D_{95}$  kivintiliseknél, illetve a VMD esetében, a „somogyi” régióban, az első- ( $\Delta 1$ ), majd a második ultrahangos kezelést ( $\Delta 2$ ) követően.

A „nógrádi” régióban a fenti kivételen túlmenően általában a várt, fokozatosan növekvő méretkülönbségeket tapasztaltuk a kisebbtől ( $D_5$  kvantilis) a nagyobb ( $D_{95}$  kvantilis) szemcseátmérő-csoportok felé haladva, az első ultrahangos kezelést követően. Két kivétel adódott csupán az 1. és n. generációs tölgyes mintaterületek esetében; mégpedig, hogy a 75%-hoz tartozó kvantiliseknél mindkét esetben nagyobb mértékű változás adódott a szemcseátmérőkben, mint a náluk nagyobb méretcsoportban, a 95%-hoz tartozó kvantiliseknél. Ez a legnagyobb aggregátumok valamelyest nagyobb stabilitására utal a „nógrádi” régióban a tölgyek esetében. A második ultrahangos kezelés hatására bekövetkező méretváltozásokat az előzőhöz hasonlóan áttekintve többnyire szintén a várt, fokozatosan növekvő méretkülönbségek voltak láthatóak; viszont az első kezelést követő változások mértékéhez viszonyítva legalább egy nagyságrenddel kisebb mértékben. (Nem tekintjük a fentebb tárgyalt „különleges” eseteket, ahol a szemcseátmérők a második energiaközlés hatására „megnövekedtek”.) Itt szintén az 1. és n. generációs tölgyes mintaterületekhez köthető a két kivétel: ezek esetében a méretváltozás

mértéke a második energiaközlés után a  $D_{75}$  és  $D_{95}$  kvantiliseknél számottevően nagyobb volt, mint más minta- és kontrollterületek ugyanezen kvantiliseinél a régióban. Ez megerősíti az előző megállapítást e legnagyobb aggregátumok valamelyest nagyobb stabilitására vonatkozóan.

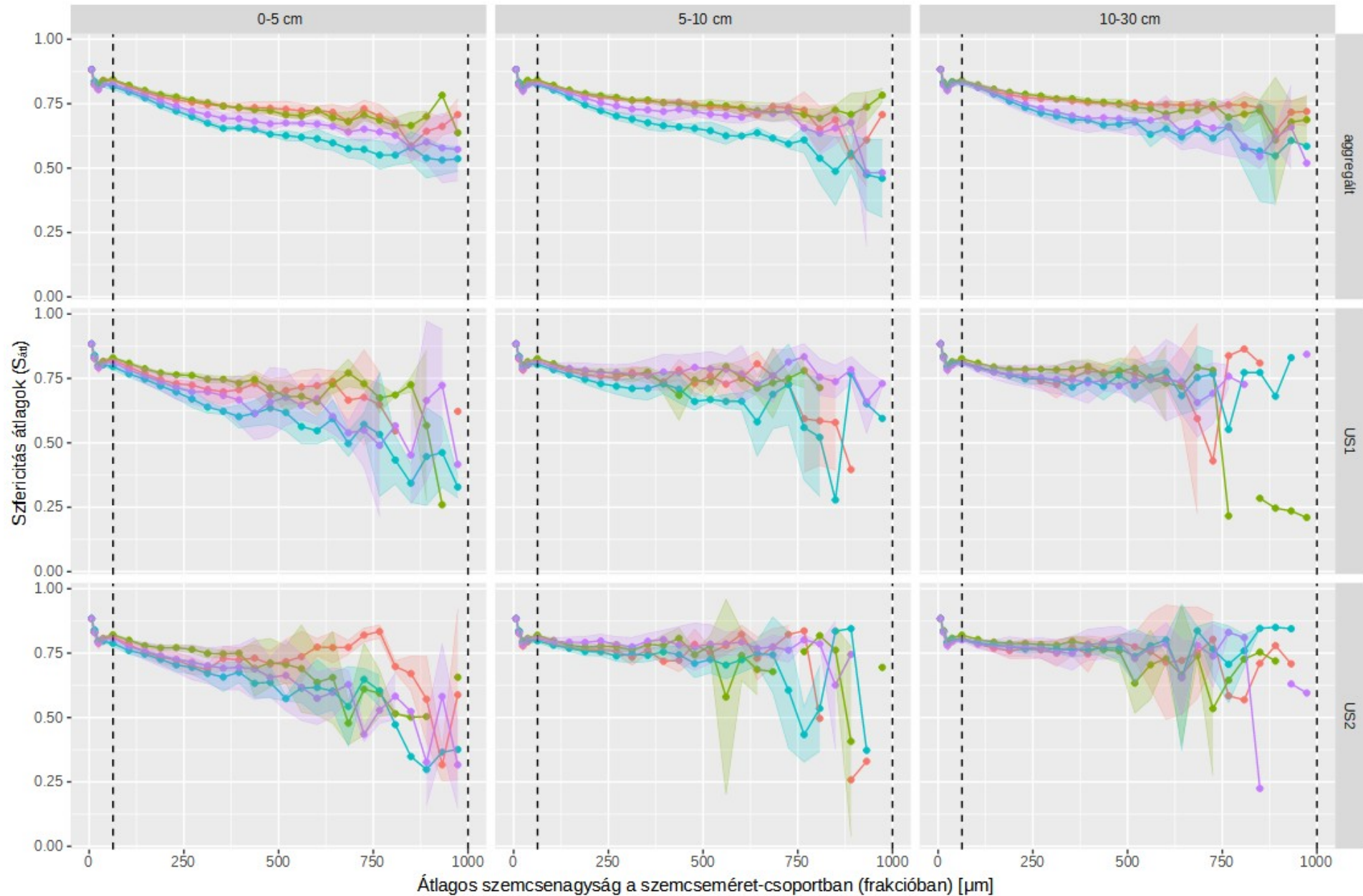
A „somogyi” régióban az aggregátumstabilitás tekintetében is egységesebben alakult a kép. Valamennyi helyszínen esetében mind az első, mind a második ultrahangos kezelést követően fokozatosan növekvő méretkülönbségek adódtak a kisebbtől a nagyobb szemcseátmérő-csoportok felé haladva; ismét eltekintve a „különleges” esetektől. Ez a növekvő aggregátummérettel csökkenő stabilitás tényét támasztja alá.

### **5.10. A szfericitás**

A korábbi eljárásnak megfelelően a sorozatmérések adataiból átlagokat képeztünk, majd sűrűségfüggvényekkel jelenítettük meg a szfericitást valamennyi minta- és kontrollterületre, a két régióban (23. a-d. ábra). Megjegyzendő, hogy a mérőműszer technikai korlátja (felbontás) miatt a vizsgálat eredményei a gyakorlatban csak a 250 – 1000  $\mu\text{m}$  közötti (makroaggregátum-) mérettartományban voltak érdemben értékelhetőek. Az ez alatti szemcseméreteknél a készülék a mérettel fordítottan arányosan egyre magasabb szfericitás-értéket rendelt a detektált mintatestekhez. A grafikonokat áttekintve szembetűnő, hogy erre a paraméterre jelentős befolyással van a szint; ugyanakkor egyik fajaggregált mintái esetében sem lehetett (alacsonyabb) szfericitás-értékeivel kitűnő szintet, vagy szinteket, illetve valamilyen mintázatot azonosítani. Szintén látható, hogy a kontrollterületek aggregált mintáinak szfericitás-értékei, illetve ezek szórása sem tért el egyértelműen a nekik megfeleltetett fás vegetációval érintett területekétől. Ebből az következik, hogy a fenti szemcseméret-tartományban a szfericitásra, mint paraméterre a fajaggregált kevés befolyással van, annak változását inkább más tényezők irányítják. Az első energiaközlést követően az aggregált minták szfericitás-értékeihez képest többnyire jelentős eltéréseket tapasztaltunk, amely az átlagos szfericitás-értékek megváltozása mellett a nagyobb szórásában is megmutatkozott. A második energiaközlés hatása a szfericitás-értékek változásában többnyire szintén látható volt, ugyanakkor ezek magyarázata e grafikonok alapján rendkívül nehéz lenne. Az alacsonyabb szfericitás-értékek általánosságban a fragmentálódó aggregátumokból kiváló szerves összetevők szabálytalan alakjára vezethetőek vissza. A minta- és kontrollterületek grafikonjait a két régióban páronként egybevetve, – az észlelt különbségek ellenére – kifejezett trendeket szintén nem tudtunk azonosítani. Ezek alapján az látható, hogy az egyes fajaggregáltak az aggregátum nagyságra kifejtett hatásukon keresztül, közvetve, kevés befolyással lehetnek a szfericitásra is. Az ultrahangos energiaközlések hatására bekövetkező aggregátum-szétesés nyomán ez a szfericitás-értékek megváltozásában is megmutatkozik, ugyanakkor megfigyelt jelenséget a fajaggregáltak befolyásával magyarázni nem tudtuk.

# „Nógrád“ - mintaterületek

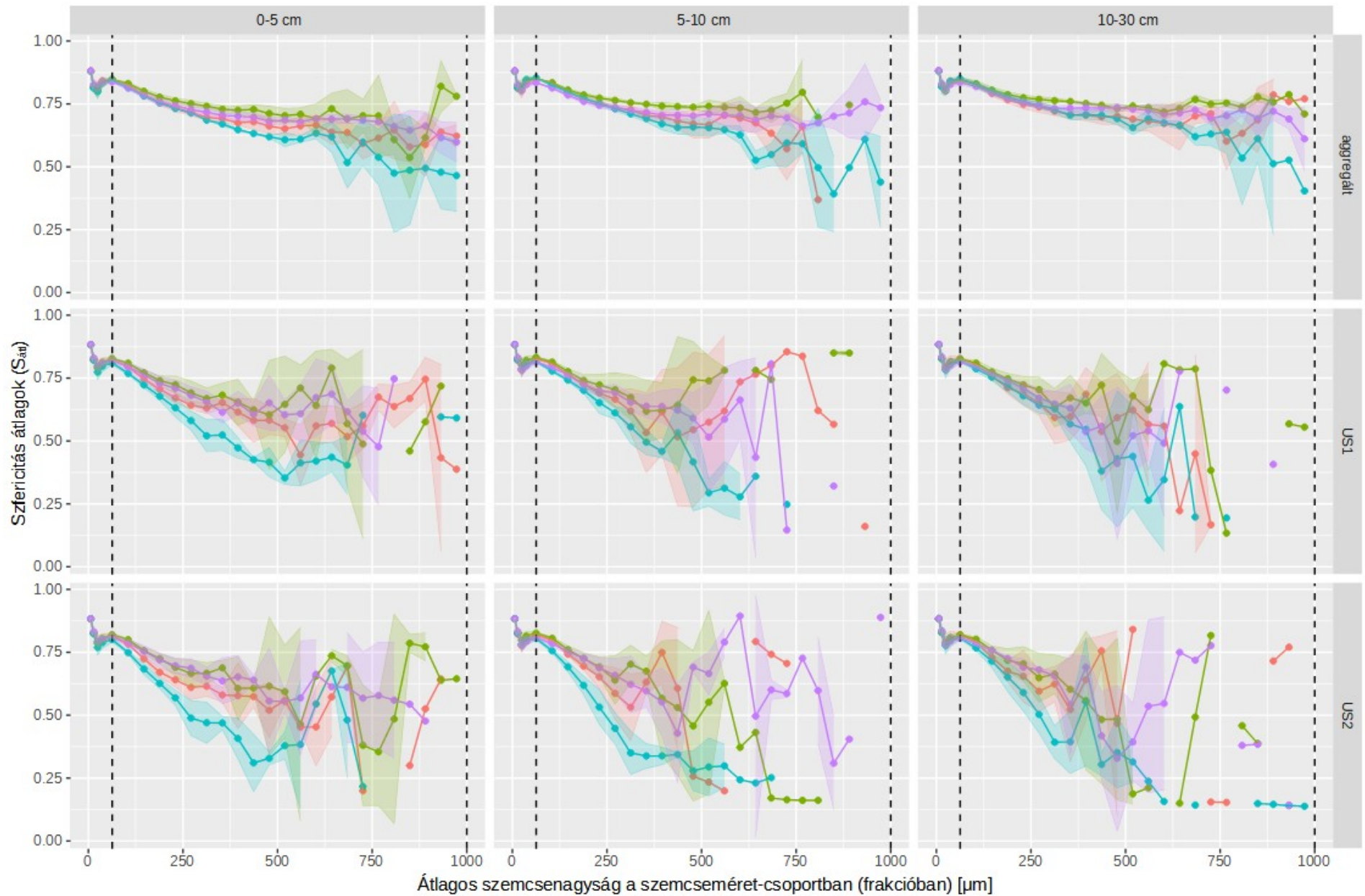
akác 1.gen. akác n.gen. tölgy 1.gen. tölgy n.gen.



23. a. ábra. Az átlagos szfericitás alakulása a "nógrádi" régió mintaterületein (N=3), az aggregált minták esetében, illetve az ultrahangos energiaközléseket (US1, US2) követően. A szaggatott függőleges vonalak a nedves szitálással kialakított frakcióhatárokat jelölik.

# „Somogy“ - mintaterületek

akác 1.gen. akác n.gen. tölgy 1.gen. tölgy n.gen.

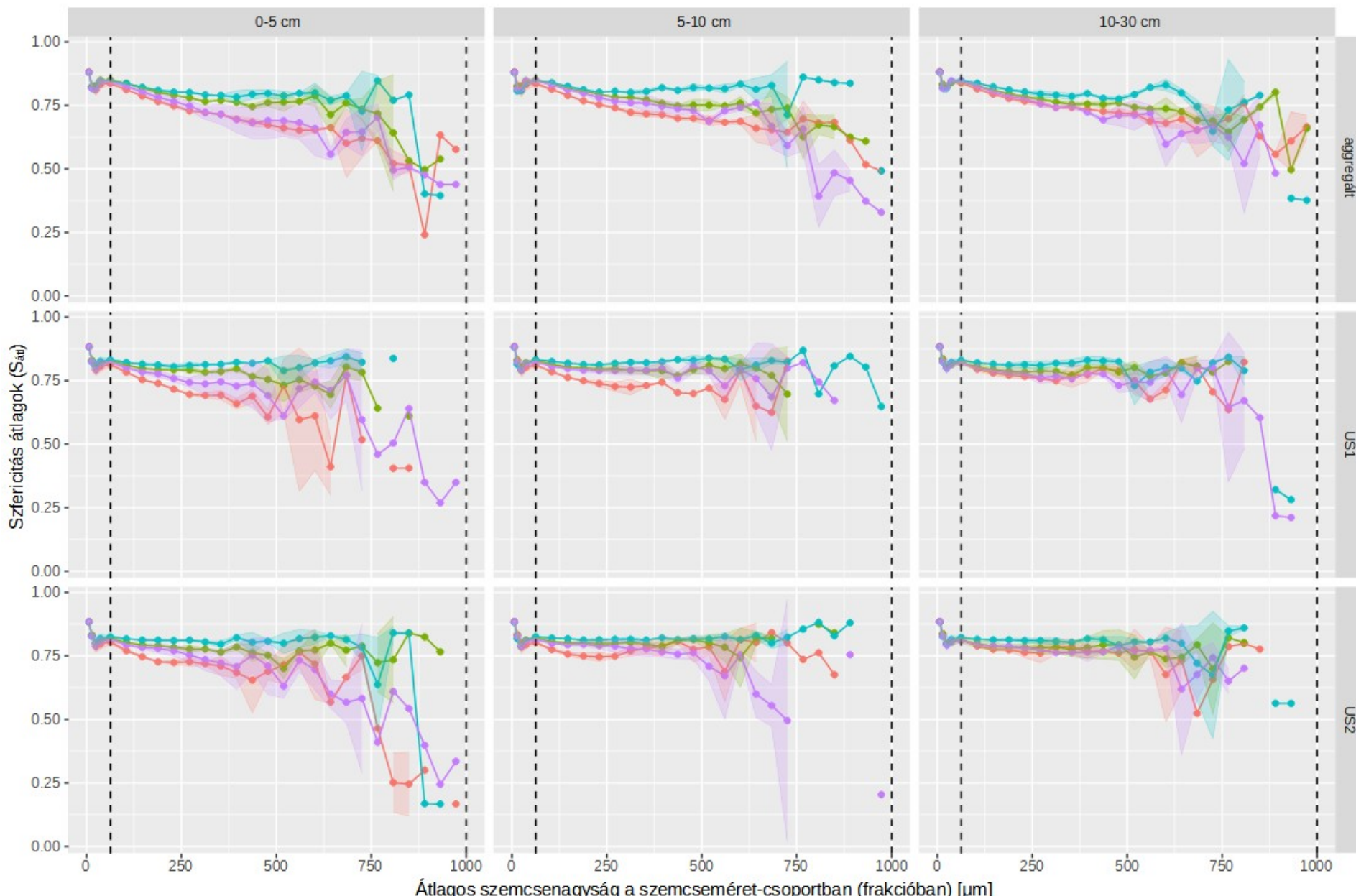


23. b. ábra. Az átlagos szericitás alakulása a "somogyi" régió mintaterületein (N=3), az aggregált minták esetében, illetve az ultrahangos energiaközléseket (US1, US2) követően. A szaggatott függőleges vonalak a nedves szitálással kialakított frakcióhatárokat jelölik.



# „Nógrád“ - kontrollterületek

akác 1.g. contr   akác n.g. contr   tölgy 1.g. contr   tölgy n.g. contr



23. c. ábra. Az átlagos szfericitás alakulása a "nógrádi" régió kontrollterületein (N=2), az aggregált minták esetében, illetve az ultrahangos energiaközléseket (US1, US2) követően. A szaggatott függőleges vonalak a nedves szitálással kialakított frakcióhatárokat jelölik.

# „Somogy“ - kontrollterületek

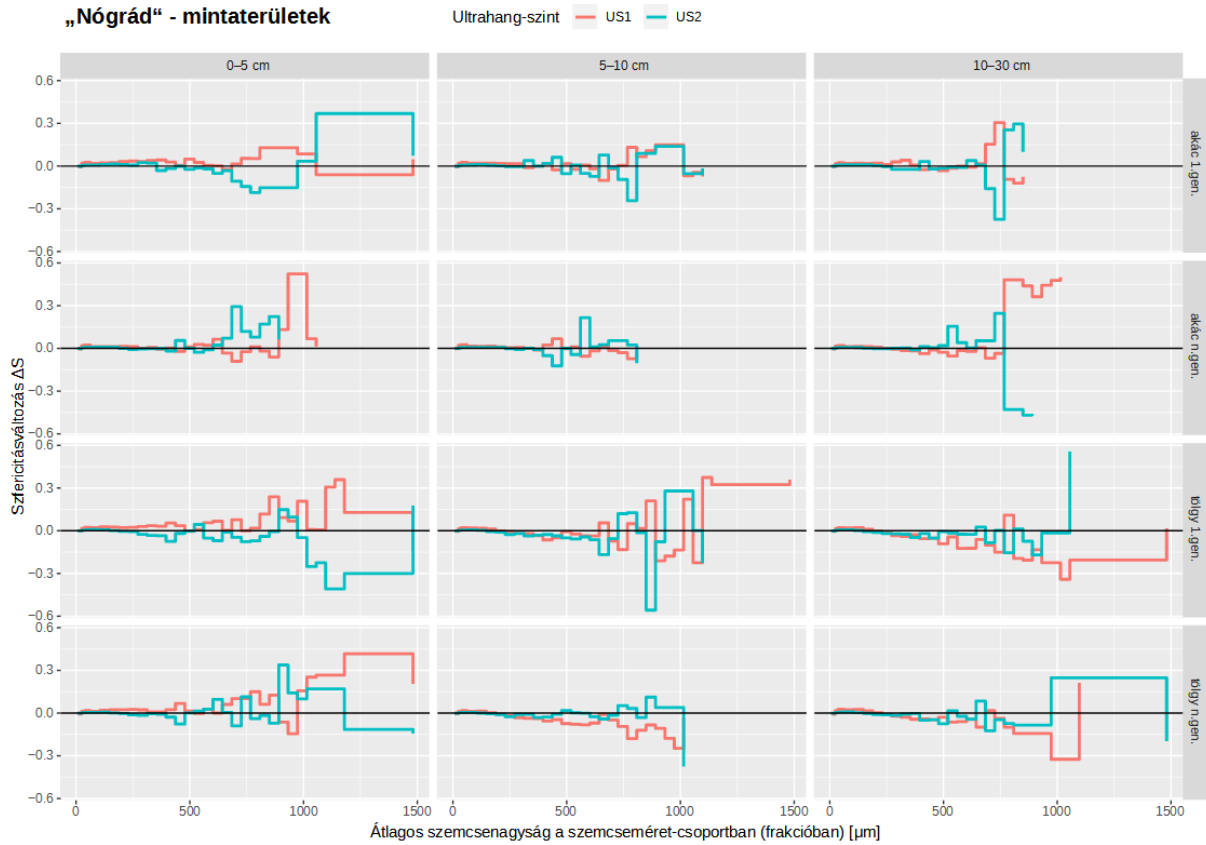
akác 1.g. contr   akác n.g. contr   tölgy 1.g. contr   tölgy n.g. contr



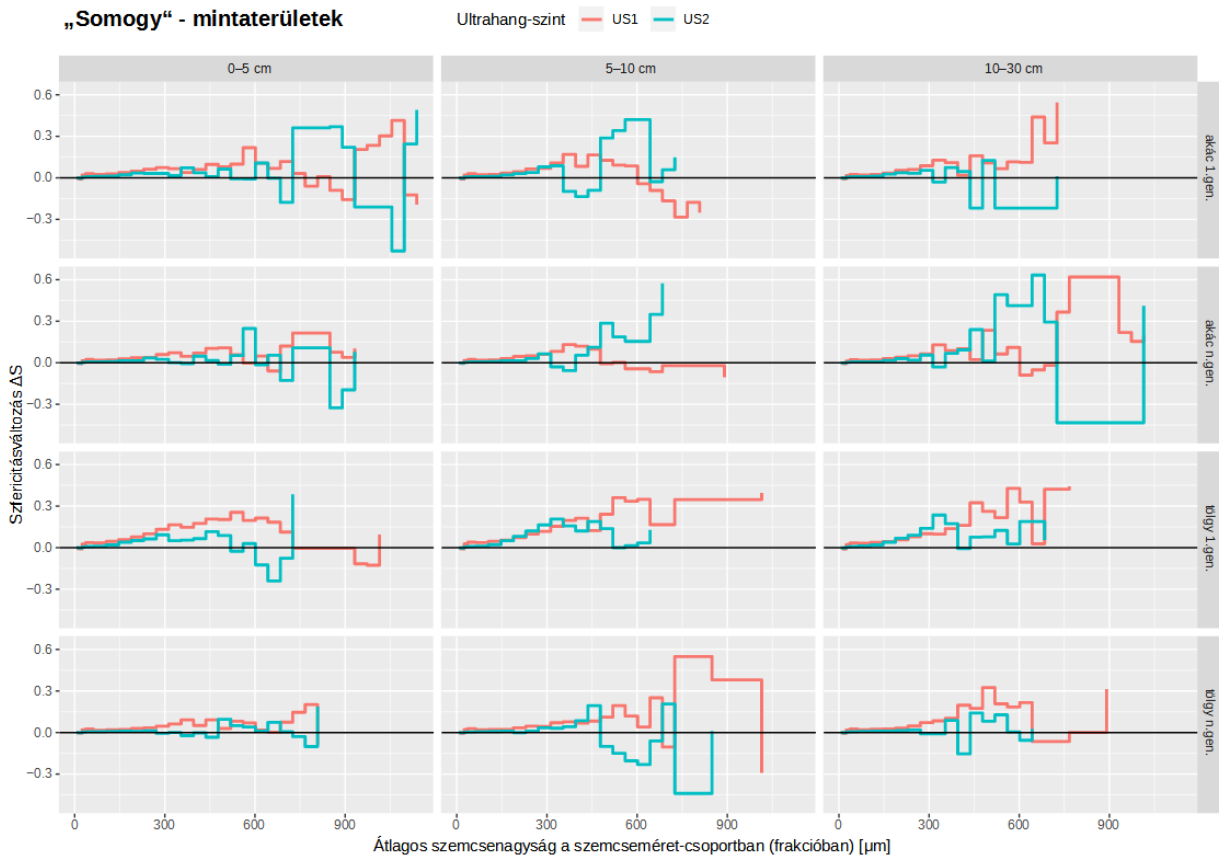
23. d. ábra. Az átlagos szféricitás alakulása a "somogyi" régió kontrollterületein (N=2), az aggregált minták esetében, illetve az ultrahangos energiaközléseket (US1, US2) követően. A szaggatott függőleges vonalak a nedves szitálással kialakított frakcióhatárokat jelölik.

A faji befolyás után tovább kutatva, valamennyi méretcsoportban kiszámítottuk, majd grafikusán ábrázoltuk (24. a-c. ábra) az aggregátumok ultrahangos roncsolása (ultrahang 1. és 2. szint) következtében végbemenő szfericitás-változásokat ( $\Delta S$ ) is. Sajnos ez sem vitt bennünket közelebb a tapasztalt jelenségek megértéséhez, ilyen módon sem sikerült semmilyen egyértelmű trendet vagy mintázatot azonosítani. Ez alátámasztja az előbbi megállapításunkat, hogy bár az aggregátumok méret- és formaparaméterei szorosan összefügghetnek; illetve az előbbire igazolt igazolt befolyással bír a fafaj (legalábbis a választott termőhelytípus-változaton), addig utóbbi alakításában nem játszik közvetlen szerepet sem első generációs erdőtelepítések, sem pedig generációk óta a termőhelyen álló erdők viszonylatában.

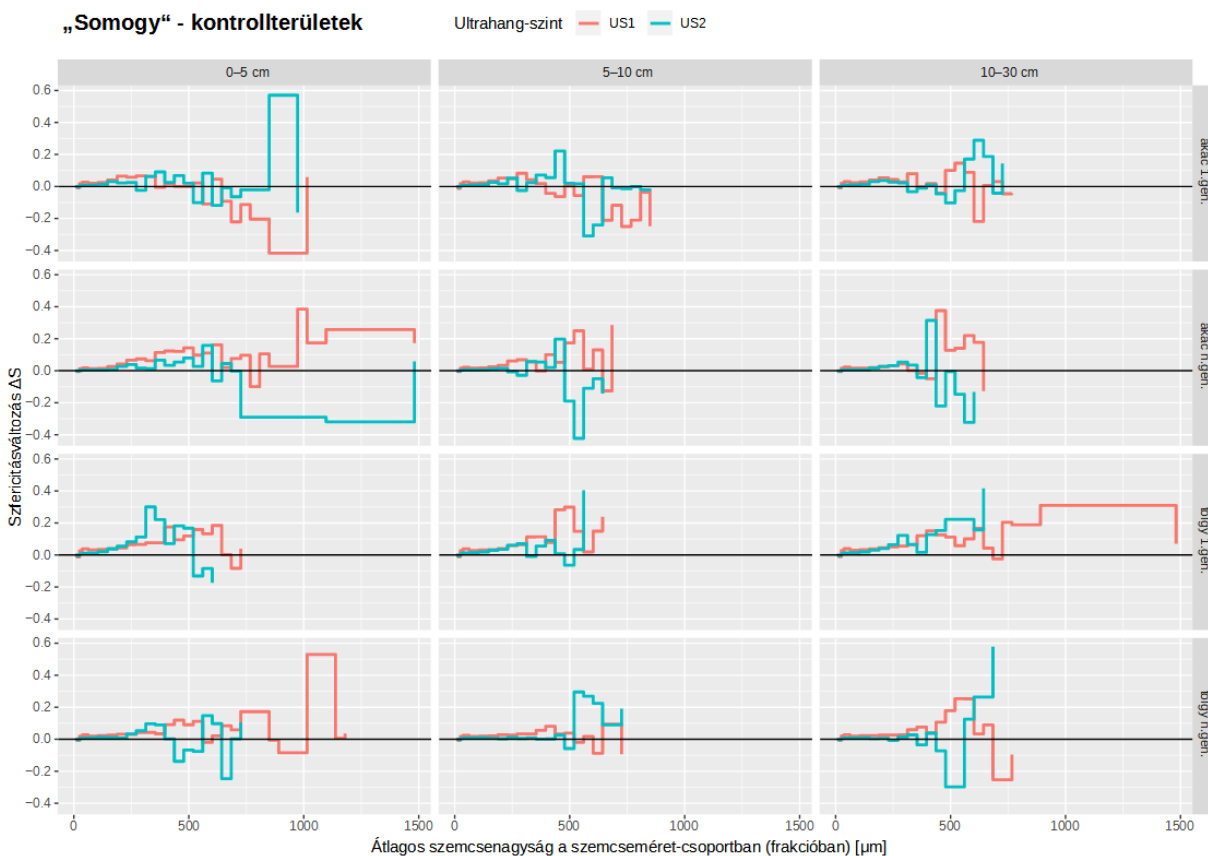
„Nógrád“ - mintaterületek



„Somogy“ - mintaterületek



24. a-b. ábra. A szféricitás-értékekben tapasztalt változás az első- (US1) és második (US2) ultrahangos kezelést követően a „nógrádi” (felül) és „somogyi” (alul) mintaterületeken.



24. c-d. ábra. A szfericitás-értékekben tapasztalt változás az első- (US1) és második (US2) ultrahangos kezelést követően a „nógrádi” (felül) és „somogyi” (alul) kontrollterületeken.

## 6. Diskusszió

### 6.1. Hamis idősor

A hamis idősoros kísérleti sémát talajtani alkalmazásban leggyakrabban szukcessziós- és talajfejlődési folyamatok, illetve azok hátterének vizsgálatához használják. Kuráz és mtsai. (2012) egy egykori bánya- majd hulladéktelep-komplexum rekultivációjához kapcsolódóan, az azt fokozatosan benövő lágú- és fás szárúak tevékenységével összefüggésben, különböző talajfizikai paraméterek változásait vizsgálták. Eredményeik több paraméter vonatkozásában igazolták a vegetáció befolyását. Az egyes vegetáció-típusokkal összefüggésben a talaj nedvességháztartásában átmeneti változások adódtak, illetve a viszonylag sekély termőrétegeken a fejlettebb fás szárú vegetáció növekedését limitálta a kialakuló nedvességihiány. A fejlettebb növénytakaró mellett ugyanakkor javult a talajok szellőzőtsége (légáteresztő-képessége). A magasabb szukcessziós fokú és korú vegetációval borított területeken igazolták a talajhőmérséklet csökkenését a gyökerekkel behálózott rétegekben. A területen megtalálható techogén agyagok textúravizsgálatai kapcsán különböző minta-előkészítések (pirofoszfátos- és FAO-módszerek) eltérő eredményekhez vezettek.

Jelen kutatás a szokásos felhasználástól némileg eltérően, egy koncepcionális modell megalkotásához vette igénybe a kronoszekvenciát, hogy segítségével megismerhessük a kocsánytalan tölgy és a fehér akác befolyását a talaj aggregátumdinamikájára és szervesanyag-tárolására, Cambisolok esetében. (A koncepcionális modellek egy összetett rendszer működését alapvetően elméleti oldalról megmagyarázó, tapasztalaton alapuló reprezentációk<sup>11</sup>.) Eredményeink tükrében a módszer általános alkalmazhatósága erre a célra igazolódott.

### 6.2. A talaj szerves szénkészlete

Valamennyi általunk vizsgált termőhelyet tekintve, a 0–30 cm-es szintben a szerves szén mennyisége 5,9 és 60,6 g kg<sup>-1</sup> között mozgott, az átlagos SOC-koncentráció 19,9 g kg<sup>-1</sup> volt. Ez némileg elmarad a Grüneberg és mtsai. (2013) által németországi bükkösök feltalajában mért 39,2 g kg<sup>-1</sup> és 58,0 g kg<sup>-1</sup> közötti értékektől, jól egybevág viszont a Fekete és mtsai. (2021) által mezofil hazai erdők 0–30 cm-es szintjére megállapított átlagos értékkel (21,1 g kg<sup>-1</sup>).

Az erdőtalajok a mezőgazdasági talajokhoz képest többnyire kevesebb szerves szenet tárolnak; feltalajaik (A-szintjük) szervesanyag-tartalma általában magasabb mint az altalajaiké (B-szint), illetve esetükben a szén alapvetően az elhalt biomassza közvetítésével jut a talajba. Szintén nem ritka, hogy erdőállományok valamilyen talajhibával rendelkező, de legalábbis a növényi élet

<sup>11</sup> Forrás: [https://en.wikipedia.org/wiki/Conceptual\\_model](https://en.wikipedia.org/wiki/Conceptual_model) (elérés: 2022. 09. 26.)

számára kedvezőtlenebb termőhelyeken állnak, mint a mezőgazdasági kultúrák. Amelung és mtsai., (2018) arról számolnak be, hogy míg sztyeppes, illetve rét- és legelőterületek (folyamatos zöld növény borítással) akár  $150 \text{ g kg}^{-1}$  szenet tárolhatnak  $A_h$  (humuszos) szintjükben, addig erdőtalajok és szántók ugyanezen szintjében jellemzően  $7,5\text{--}20 \text{ g kg}^{-1}$  közötti széntartalmakat mérhetünk. Előbbiek esetében ugyanis az elhalt növényi gyökerekből származó biomassza lényegesen nagyobb hányadot tesz ki, mint erdőtalajok esetében. Ennek jellemző aránya lomb- és tűlevelű erdők esetében  $20\text{--}50\%$  között mozog; búzaföldeken kb.  $25\%$ , míg rét- és legelőterületek esetében kb.  $40\%$  (Amelung et al., 2018). A használatból eredő biomassza-elvonás frekvenciája, és az emberi beavatkozások módja szintén lényeges lehet valamely termőhely szén- (és nitrogénkészletének) alakulása szempontjából. Ezekkel a mezőgazdasági művelésű területek (esetünkben a kontrollterületek nagyobb része) intenzívebben érintettek, mint a tartamosan vegetációval borítottak; ugyanakkor ezen tényezőket jelen kutatás nem vizsgálta.

### 6.3. Tartamos szervesanyag-megkötés a talajban

A tartamosan kötött szerves szén mennyisége erdőtalajokban az elhalt biomasszából (legfőképpen az elhalt gyökértömegeből és az avarból) származó szerves szén input-, illetve az adott termőhelyre jellemző mineralizálódási ráta között kialakuló egyensúly szerint alakul (Golchin et al., 1994); más szavakkal adott termőhely szerves szén-megkötési potenciáljától függ (Hassink, 1997).

Magyarországi SOM-frakcionálási adatok hiányában eredményeinket külföldi kutatási eredményekkel összevetve értelmeztük. Grüneberg és mtsai. (2013) a Hainich Nemzeti Park (Németország) területén Cambisolokon, Luvisolokon és Stanosolokon növényes bükkösök termőhelyeinek humuszos ( $A_h$ ) szintjét (felső 10 cm) vizsgálták, az általunk is alkalmazott frakcionálási eljárás használatával. Céljuk különböző gazdálkodási formákhoz köthetően a szabad- (fLF), közép- (oLF) és hosszú távon kötött (HF) szerves szén mennyiségének meghatározása, majd az adatok összevetése volt. A kutatásba vont bükkösök alatt az fLF-frakcióban  $341,2 \pm 4,1$  és  $382,0 \pm 5,2 \text{ g kg}^{-1}$  közötti, az oLF-frakcióban  $255,4 \pm 7,6$  és  $351,2 \pm 20,5 \text{ g kg}^{-1}$  közötti, míg a HF-frakcióban  $25,9 \pm 2,6$  és  $38,9 \pm 6,3 \text{ g kg}^{-1}$  közötti szerves széntartalmakat (OC) mérték. Jelen munkában a fafaji befolyás kimutatására a fás vegetációk termőhelyeit fátlan kontrollterületekével vetettük egybe. Az OC-koncentrációk adatait a 0–10 cm-es szintre összesítve, a németországinál alacsonyabb értékeket kaptunk az fLF- és HF-frakciókban, ugyanakkor magasabbakat az oLF-frakcióban (9. táblázat).



Besorolás		„Nógrád”			„Somogy”		
		c C <sub>FLF</sub> [g kg <sup>-1</sup> ]	c C <sub>OLF</sub> [g kg <sup>-1</sup> ]	c C <sub>HF</sub> [g kg <sup>-1</sup> ]	c C <sub>FLF</sub> [g kg <sup>-1</sup> ]	c C <sub>OLF</sub> [g kg <sup>-1</sup> ]	c C <sub>HF</sub> [g kg <sup>-1</sup> ]
<b>mintaterületek</b>	min.	253,1	422,9	11,4	171,5	400,6	10,8
	$\tilde{x}$	270,6	440,9	17,7	231,8	434,2	17,2
	$\bar{x}$	268,1	441,7	19,1	226,1	427,4	17,3
	max.	278,0	462,3	29,6	269,3	440,7	24,1
	$\sigma$	9,7	15,0	6,7	35,7	16,0	5,0
<b>kontrollterületek</b>	min.	216,5	399,8	6,4	104,8	416,3	12,4
	$\tilde{x}$	265,4	431,2	10,4	202,4	434,2	15,4
	$\bar{x}$	259,2	426,7	10,6	191,6	433,7	17,2
	max.	289,6	444,5	15,1	257,1	450,0	25,5
	$\sigma$	28,8	16,5	3,1	55,2	12,9	5,1

9. táblázat. A szerves szén koncentrációk minta- és kontrollterületekre összesített adatai (minimum-, medián-, átlag-, maximum- és szórás adatokkal) az egyes SOM-frakcióiban, a 0-10 cm-es szintben.

Az eredmények alapján arra a következtetésre juthatunk, hogy az egyes frakciókban tárolt szerves szén mennyiségére a legtöbb termőhelyi- és klimatikus paraméter jelentősebb befolyással bír a fajtánál, ugyanakkor még megközelítőleg azonos termőhelyi- és klimatikus viszonyok mellett (vö. a „nógrádi” és „somogyi” helyszínek adatait) is jelentős regionális különbségek adódhatnak. Ez magyarázza a német- és hazai adatok nagyobb eltéréseit, illetve megerősíti a szerves szén-megkötési potenciál egyediségére vonatkozó elméletet. Az egyes frakciók OC-koncentrációit egymáshoz viszonyítva (például a frakciókat OC-koncentráció szerint csökkenő sorrendbe állítva) a német bükkösökétől ( $c C_{FLF} > c C_{OLF} > c C_{HF}$ ) eltérő sorrendet ( $c C_{OLF} > c C_{FLF} > c C_{HF}$ ) kapunk, amely háttérben a biotópok különbözősége, többek között a különböző fajokhoz köthető jelentős mikrokörnyezeti különbségek (Joly et al., 2017) sejthetőek. Mindez a korábbi feltételezésünkkel összhangban az eltérő szervesanyag-megkötési mechanizmusok (eltérő „utak”) lehetőségére enged következtetni.

#### 6.4. Az aggregátumok

A hazai- és nemzetközi szakirodalmakat tanulmányozva látható, hogy több mezőgazdasági-, mint erdészeti vonatkozású cikk érhető el talajaggregátumokkal kapcsolatban; ugyanakkor a szinte kutatásonként eltérő célok, vizsgálati módok és tudományos kérdésfeltevés megnehezíti az eredmények összehasonlítását. Ennek megfelelően inkább az eredmények alapján levont következtetések összevetése (azok megerősítése vagy cáfolása); illetve logikai sorba fűzése volt lehetséges.



Haynes (2000) megállapította, hogy a hosszútávú rét- és legelőterületek talajában stabilabb aggregátumok találhatóak, mint hosszútávú mezőgazdasági területek talajában, illetve a használati mód kedvező irányú változása (szántóterületen hosszútávú rét- és legelőgazdálkodás) növeli a talajban az aggregátumstabilitást, még akkor is, ha a kiindulási SOC-tartalom hasonló volt. Ez párhuzamba állítható az általunk végzett kísérlettel, amelyben faállományok aggregátumméretre- és stabilitásra gyakorolt befolyását vizsgáltuk, fátlan kontrollterületekkel egybevetve. Vizsgálataink a „nógrádi” régióban, tölgy fafaj és makroaggregátumok esetében igazolták a fafaj (gyenge) stabilitásnövelő hatását a mezőgazdasági területekkel való egybevetésben.

Jakab és mtsai., (2016) eróziós kísérlethez kapcsolódóan megállapították, hogy a szántáshoz köthetően kialakuló nagyobb stabilitás a kisebb aggregátumok körében kiemelt jelentőséggel bír a SOC-megkötés szempontjából. Az aggregátum-hierarchia-elmélet egyik bizonyítéka, hogy a makroaggregátumok először többnyire mikroaggregátumokra esnek szét, azután pedig elsődleges szemcsékre (Oades, 1984). Szintén ezzel függ össze, hogy a talajokban az aggregátumnagysággal a szénttartalom (SOC-koncentráció) is nő, ugyanakkor makroaggregátumokban több a „frissebb”, mobilis szerves szén, mint mikroaggregátumokban (Elliott, 1986). Mindez egybevághat az általunk is alátámasztott általános összefüggéssel is: csökkenő aggregátummérettel növekszik azok stabilitása.

Juhos és mtsai., (2021) kimutatták, hogy a növekvő avar input általánosságban fokozza erdőtalajok feltalajában, a 0–5 cm-es szintben a makroaggregátumok-képződését, illetve stabilitását. Ehhez hasonló jelenséget, magasabb aggregátumstabilitást igazoltak Fattat és mtsai. (2011) is, olyan erdőtümbökben, ahol az aljnövényzet extra ültetés miatt magasabb fejlettségű volt. Mindezt a magasabb SOC-tartalommal és a gyökerekkel való sűrűbb átszőttiséggel indokolták. Mindkét kutatásban leírt jelenség a fás szárúak befolyására vezethető vissza, így alátámasztja az általunk tölgyek esetében igazolt (fentebb említett) stabilitásnövekedést.

Jenne (2020) németországi Cambisol-mintaterületeken (Moslooh), az 5–10 cm-es humuszos (Ah) szintben vizsgálta a bükk, a jegenye és a luc fafajok befolyását az aggregátumnagyságra, aggregátumstabilitásra és a szfericitásra. Bár a mikroaggregátumok körében az egyes fafajoknál némileg eltérő nagyságokat mért, összességében nem tudott egyértelmű fajfaj hatást igazolni. Az aggregátumstabilitás vonatkozásában szintén csak a már ismert, – növekvő aggregátummérettel csökkenő stabilitás – összefüggést tudta megerősíteni. Ezzel szemben vizsgálataink – alapvetően fátlan kontrollterületekhez képest – igazolták mind első, mind többedik generáció óta a területen lévő akác és tölgy állományok aggregátumméretre gyakorolt pozitív hatását; illetve – az említett összefüggésen túlmenően – a tölgy fafaj aggregátumstabilitás-növelő hatását a

„nógrádi” régióban. Szfericitás tekintetében sem Jenne (2020), sem jelen kutatás nem igazolt fafaji befolyást; az aggregált minták szfericitásában tapasztalt (kisebb) különbségeket, illetve hasonlóságokat más általunk vizsgált paraméterrel sem tudtuk megmagyarázni.

## 6.5. Hipotézisvizsgálat

A hipotézisek formájában felállított nyitott szakmai kérdések, amelyeket a disszertáció legelején soroltunk fel, a tanulmány eredményei alapján a következőképpen válaszolhatóak meg:

*Hipotézis 1:* A hipotézist teljes körben megerősítjük.

*Hipotézis 2:* A hipotézist csak részben tudjuk megerősíteni. A teljes körű igazoláshoz az aggregátumstabilitást szabályozó (termőhelyi és ökológiai) tényezők célzott kutatására volna szükség.

*Hipotézis 3:* A hipotézist teljes körben megerősítjük.

*Hipotézis 4:* A hipotézist elvetjük. Bár a szénraktározás mértéke az egyes szintekben fafajonként eltérően alakult, a modellezés hosszabb távon inkább a tölgyes termőhelyek javára prognosztizálta a nagyobb tartamosan kötött szerves szenet a talajban. Úgyszintén az első generációs tölgy termőhelyeken mutatkozott az aggregátumok nagyobb száma (illetve mérete).

## 6.6. Kitekintés

Bár dolgozatunk tárgyát közvetlenül nem képezte, szeretnénk volna az eredmények tükrében az ökológiai vonatkozásokra is röviden kitérni, hiszen a kutatás tervezésekor nem véletlenül esett a választás e két fafajra. Magyarországon az akácra sok tekintetben még mindig mint „várományosra” tekint az erdész szakma; annak jelentősége és indokoltsága számos termőhelyen valóban jól megalapozott. Korunk változó környezeti viszonyai mellett (különös tekintettel a klímaváltozásra) ugyanakkor meggondolandó, hogy szakmailag kellően átgondolt döntés-e ekkora léptékben néhány (ekzóta) fafajra építeni (ld. a tömegesen pusztuló feketefenyő-állományok példáját), hiszen az akácnak is egyre több kórokozója és kártevője kerül elő, Európából is. Közismerten jó területmegtartó képessége okán (tuskóról és gyökérről is kiválóan sarjad) egy esetleges fafajcsere csak drasztikus beavatkozásokkal kivitelezhető (Bartha et al., 2006), és a keletkezett humuszos réteg könnyen áldozatul eshet a teljes talaj-előkészítést követő erózióknak és deflációknak. Így az évtizedek alatt végbement talajfeloldásbeni-, illetve szervesanyag-megkötésbeni előrelépések hamar semmissé válhatnak. Ennek értelmében – ahol lehetséges – mindenképpen az ökológiailag értékesebb és stabilabb őshonos fafajok (köztük a tölgyek) preferálását javasoljuk.

Jelen kutatás az egyes termőhelyek mikrobiális viszonyainak kulcsszerepére is rávilágít, mind a talajok hosszabb távú szervesanyag-tárolása, mind aggregátumdinamikája szempontjából, ezért a kutatást ebbe az irányba volna célszerű tovább folytatni/bővíteni.

## 7. Új tudományos eredmények (tézisek)

A kutatás során kapott új tudományos eredmények összegzése tézispontokban:

1. A talajminták fizikai féleségének hatékonyabb vizsgálatát szolgáló „Pario® classic” eszköz mérési eredményei a közép iszap frakciót leszámítva, kiváltképp magasabb agyagtartalom esetében nem feleltethetőek meg a Köhn-pipettával mért eredményeknek. Az általunk kidolgozott (szemiempirikus) lineáris regressziós függvényekkel <5% [m/m] alatti hibával korrigálhatóak a hibás iszap- és agyagfrakciók részarányai.
2. Eredményeink szignifikáns eléréseket igazoltak a talaj átmenetileg (fLF) és hosszabb időszakra kötött szerves frakcióinak (oLF és HF) vonatkozásában is, mind a minta- és kontrollterületek, mind az első- és többedik generációs állományok között. Az, hogy melyek voltak a ható termőhelyi tényezők, illetve milyen befolyással bírtak az egyes fafajok a „készletváltásra” frakciónként, mélységi szintenként és a két régióban is valamelyest különböző volt, de a tendenciák hasonlóak.
3. Adatainkból lineáris kevert-hatás modellekkel a kocsánytalan tölgy szignifikáns pozitív befolyását igazoltuk fátlan kontrollterületekhez képest, az 5–10 cm-es ásványi rétegben az átmenetileg, illetve hosszútávon kötött szervesanyag-raktárak (fLF és a HF-frakciók) vonatkozásában is. Fehér akác esetében az előzőekhez hasonló egybevetéssel bonyolultabb összefüggés adódott. A 0–5 cm-es rétegben az átmeneti könnyű frakció (fLF) mennyiségére az akác szignifikánsan negatívan hatott. A középtávon kötött könnyű frakcióban (oLF) viszont az akác jelenlétében szignifikánsan nagyobb készleteket mértünk, mind a 0–5 cm-es, mind az 5–10 cm-es mélységekben a fátlan területekénél.
4. A modellezés rávilágított, hogy a vizsgált talajokban egyes frakciók mennyiségi alakulása többnyire nem bír szignifikáns befolyással más frakciók mennyiségére. Kivétel: a nehéz frakció (HF), amelyre a szabad könnyű frakció (fLF) mennyisége szignifikánsan hat. Következtetés: a szervesanyag-megkötés folyamata a talajokban nem (feltétlen) a várt utat (fLF → oLF → HF) követi.
5. A SOM-frakciók és a termőhelyek általános C/N arányainak egybevetése a mikrobiális lebontottság (komposztálódottság) mértékén keresztül a szerves anyag mobilitására enged következtetni adott termőhelyen. Méréseink alapján látható, hogy a többedik generációs állományok termőhelyein a C/N-arányok mindkét fafaj esetében (a „somogyi” akácos kivételével) szignifikánsan eltértek a kontrollterületekétől. Az első generációs állományok befolyása mérsékeltebb, a kontrollterületekkel egybevetve nem szignifikáns. Fás vegetációval borított területeken az avar jelentette rendszeres input (alacsony

lebontottságú SOM) általánosságban az arányszámok magasabb szórásában is megmutatkozott. A könnyű frakciókra (fLF, oLF) a referencia C/N-aránynál magasabb arányszámok adódtak, amely az alacsonyabb lebontottságú, „friss” elhalt szerves összetevők magasabb részarányát jelzi ezekben a frakciókban. Legalacsonyabb C/N-arányú valamennyi esetben a mineralizálódás magas fokán álló nehéz (HF) frakció volt, amely arra utal, hogy ebben a frakcióban a szaprobionták számára alig/nem hozzáférhetően, hosszú távra raktározódik a szerves anyag.

6. Az aggregátumok méretmegoszlása a két régióban, illetve fafaj, generáció és ásványi szint viszonylatában is különbözően alakult. A fátlan kontrollterületek homogénebb megoszlásokat mutattak a fás vegetációval borított mintaterületekénél. A „somogyi” régióban „nógrádinál” több mikroaggregátum (< 250  $\mu\text{m}$ ) volt detektálható, amiben közrejátszik a „somogyi” minták magasabb iszap és agyagtartalma (a több „kisebb” primer szemcse) is. Aggregátumméret alapján a következő sorrendiség adódott: fátlan területek < akác termőhelyek < tölgy termőhelyek.
7. Az aggregátumstabilitás-vizsgálatok alapvetően a már ismert fordított arányosságot erősítették meg: növekvő mérettel csökken a stabilitás; ugyanakkor a nagyobb méretű aggregátumok valamelyest nagyobb stabilitása igazolódott a „nógrádi” régió tölgyeseiben.
8. A kapott eredmények igazolták a kocsánytalan tölgy és a fehér akác fafajok befolyását a talaj aggregátumdinamikájára a 0–30 cm-es ásványi szintben.
9. A hamis idősoros kísérleti séma sikeresen alkalmazható szénmegkötési, aggregátumképződési (végső soron talajfejlődési) folyamatok tanulmányozására, illetve e folyamatokban az egyes fafajok befolyásának feltárására.

## 8. Összefoglalás

Az aggregátumok változatos képződmények, amelyek nagyságban, formában, stabilitásukban és keletkezésük körülményeit tekintve is különbözhetnek egymástól. A talajban hosszabb-rövidebb ideig kötött, elhalt szerves anyag e szerkezeti összetevők integráns részét képezi. Az aggregátumok keletkezése és szétesése a talajban egy dinamikus folyamat, amely változatos termőhelyi paraméterek és egyéb tényezők befolyása alatt áll; köztük erdősített területek esetében a fafajjal. Az aggregátumok jelenléte, stabilitása szorosan összefügg a főbb talajparaméterek fennmaradásával, vagy azok javításával/javulásával, és a hosszútávú, fenntartható szénmegkötéssel is a talajban.

Jelen erdészeti témájú kutatás kocsánytalan tölgy és fehér akác állományok befolyását vizsgálta, egy hamis idősoros kísérlet keretében. Ennek kapcsán első-, illetve többedik generáció (több véghasználat) óta fennálló akác és tölgy állományok talajait fátlan kontrollterületekével vetettük egybe; cseres-kocsánytalan tölgyes klímában, Cambisolokon. Ehhez a minták fizikai féleségét Köhn-féle pipettás és Pario<sup>®</sup>-készülékkel vizsgáltuk. A talaj szabad-, illetve közép- és hosszú távra kötött szerves anyagait a Golchin és mtsai. (1994) által kidolgozott módszer szerint frakcionáltuk. Az aggregátumok méretét és formaparaméterét (szfericitás) dinamikus képanalízissel határoztuk meg, amellyel egybekötve végeztük az aggregátumstabilitás vizsgálatokat is.

Vizsgálataink alapján bebizonyosodott, hogy fás vegetációval borított termőhelyeken az idő előrehaladtával mind a közép-, mind a hosszabb távú talaj-szénraktárakban nagyobb valószínűséggel várható készletnövekedés, mint fátlan területeken. Méréseink szerint a feltalaj 0–10 cm-es szintjében, többedik generációs állományok összevetésében átlag  $22,3 \pm 7,3 \text{ g kg}^{-1}$  hosszú távra megkötött szén volt az akácok, illetve  $19,9 \pm 4,2 \text{ g kg}^{-1}$  a tölgy állományok alatt. A középtávra kötött szén esetében, ugyanezen faállományokat vizsgálva az akácok alatt átlag  $444,7 \pm 4,0 \text{ g kg}^{-1}$ , míg tölgyesek alatt átlag  $430,7 \pm 7,8 \text{ g kg}^{-1}$ -ot mértünk. A modellezés (LMM-ekkel) rávilágított, hogy a szervesanyag-megkötés folyamatában a közép- és hosszútávon kötött frakciók készletnövekedését elősegítő paraméterek mások, mint amelyek a szabad frakció gyarapodásának kedveznek; vagyis a folyamat a szabad könnyű- → kötött könnyű- → nehéz frakció sorrendtől eltérhet. Az egyes termőhelyeket 0–30 cm-es szintjeik összevont adatai alapján, a legnagyobb aggregátumok (a  $D_{95}$  kvantilissel definiált méretosztály adatai), illetve a térfogattal súlyozott átlagos szemcseátmérő ( $VMD$ ) szerint is sorrendbe állítottuk. Mindkét régióban (a  $D_{95}$  és a  $VMD$  alapján is) tölgyesek talajában mértük a legnagyobb aggregátumméretet. „Nógrádban” a nagyság szerinti sorban az első az 1. generációs tölgyes volt:  $953,4 \mu\text{m}$  maximális-, illetve  $376,5 \mu\text{m}$  átlagos aggregátummérettel; ezt követte az n. generációs

tölgyes 873,3  $\mu\text{m}$  maximális-, illetve 330,2  $\mu\text{m}$  átlagos aggregátummérettel. Az előzőnek megfelelő sorba rendezés szerint „Somogyban” első helyre az n. generációs tölgyes ( $D_{95} = 886,9$   $\mu\text{m}$ ,  $VMD = 324,4$   $\mu\text{m}$ ); másodikra annak kontrollterülete került ( $D_{95} = 677,2$   $\mu\text{m}$ ,  $VMD = 235,3$   $\mu\text{m}$ ). Az aggregátumstabilitás vonatkozásában alapvetően az ismert fordított arányosság érvényesült (csökkenő aggregátummérettel növekvő stabilitás), ugyanakkor a „nógrádi” régió tölgyeseiben, a legnagyobb aggregátumok valamelyest nagyobb stabilitása igazolódott. A szfericitás, illetve szfericitás-változás vonatkozásában nem sikerült fajfaji befolyást igazolni.

## 9. Köszönetnyilvánítás

Hálával tartozom mindazoknak, akik bármilyen formában hozzájárultak a disszertációm elkészültéhez, illetve akik ezen a röögös, sokszor végeleáthatatlannak tűnő, de szép úton elkísértek. A kézben tartott dolgozat valóban egy nemzetközi csapatmunka eredménye. Nehéz volna, és nem is szeretnék sorrendiséget állítani; mind a soproni, mind a freiburgi team rengeteg időt és energiát fektetett be annak érdekében, hogy a munka elkészüljön. Jó érzés volt úgy dolgozni, hogy a témavezetőim, Dr. Heil Bálint és Dr. Kovács Gábor jelentette biztos háttéren túlmenően freiburgi konzulenseim támogatására is számíthatok. Hatalmas lehetőséget kaptam azáltal, hogy a mérések dandárját Freiburgban, a Professur für Bodenökologie laboratóriumában végezhettem. Mindeközben rengeteg segítséget kaptam, és még annál is többet tanultam Dr. Friederike Lang professzor asszonytól és Dr. Helmer Schack-Kirchnertől, illetve munkatársaimtól: Jaane Krügerától, Rebekka Maiertől, Gilles Kaysertől, Dr. Kenton Stutztól és laboros kollégáimtól: Petra Großmanntól, Christina Petschketől, Nicole Spechttól és Petra Wiedemertől egyaránt. Köszönöm a jó ötleteket, korrekciós javaslatokat, és a konstruktív kritikát opponenseimnek: Dr. Makó András professzor úrnak és Dr. Kalicz Péternek; szakmai segítségük sokat emelt a dolgozat minőségén.

Nem utolsó sorban hálás vagyok családomnak: feleségemnek, Dr. Fekete Csillának, kisfiamnak, Mátra Gergelynek, szüleimnek, id. Mátra Zsoltnak és Mátráné Mester Klárának, testvéreimnek Gyöngyinek és Zsoltnak a sok-sok türelemért, az önzetlen támogatásért és olykor az együttgondolkodásért. Zsoltnak külön köszönet jár az angol fordításban nyújtott segítségéért.



## 10. Irodalomjegyzék

ALMAJMAIE, A. - HARDIE, M. - ACUNA, T. - BIRCH, C. (2017): Evaluation of methods for determining soil aggregate stability. *Soil and Tillage Research*. Volume 167, pp. 39–45. <https://doi.org/10.1016/j.still.2016.11.003>

AMELUNG, W. - BLUME, H.-P. - FLEIGE, H. - HORN, R. - KANDELER, E. - KÖGEL-KNABNER, I. - KRETZSCHMAR, R. - STAHR, K. - WILKE, B.-M. (2018): Scheffer/Schachtschabel Lehrbuch der Bodenkunde. 17. átdolgozott, kiegészített kiadás. Springer Spektrum, Springer-Verlag GmbH, DE. Berlin. ISBN 978-3-662-55870-6. <https://doi.org/10.1007/978-3-662-55871-3>

AMÉZKETA, E. (1999): Soil Aggregate Stability: A Review. *Journal of Sustainable Agriculture*. Volume 14, Issues 2–3, pp. 83–151. [https://doi.org/10.1300/J064v14n02\\_08](https://doi.org/10.1300/J064v14n02_08)

ASHMAN, M.R. - HALLETT, P.D. - BROOKES, P.C. - ALLEN J. (2009): Evaluating soil stabilisation by biological processes using step-wise aggregate fractionation. *Soil and Tillage Research*. Volume 102, Issue 2, pp. 209–215. ISSN 0167-1987. <https://doi.org/10.1016/j.still.2008.07.005>

ANGERS, D.A. & CARON, J. (1998): Plant-induced Changes in Soil Structure: Processes and Feedbacks. *Biogeochemistry*. Volume 42, Issue 1, pp. 55–72. <https://doi.org/10.1023/A:1005944025343>

BAISDEN, W. T. - AMUNDSON, R. - COOK, A.C. - BRENNER, D.L. (2002): Turnover and storage of C and N in five density fractions from California annual grassland surface soils, *Global Biogeochemical Cycles*. Volume 16, Nr. 4, 1117. <https://doi.org/10.1029/2001GB001822>

BARTHA, D. (1999): Magyarország fa- és cserjefajai. Mezőgazda Kiadó, Budapest. p.172. ISBN 963 286 1051.

BARTHA D. - CSISZÁR, Á. - ZSIGMOND, V. (2006): Fehér akác. In: BOTTA-DUKÁT, Z. – MIHÁLY, B. (eds.): *Biológiai inváziók Magyarországon – Özönnövények II. A KVVV Természetvédelmi Hivatalának Tanulmánykötetei* 10, pp. 37–67. Budapest, 2006. ISBN 963 87073 2 1.

BATES, D. - MÄCHLER, M. - BOLKER, B. - WALKER, S. (2015): Fitting Linear Mixed-Effects Models Using lme4. *Journal of Statistical Software*, 67(1), pp. 1–48. <https://doi.org/10.18637/jss.v067.i01>

BATJES, N. (1996): Total carbon and nitrogen in the soils of the world. *European Journal of Soil Science*. Volume 47, Issue 2, pp. 151–163. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2389.1996.tb01386.x>

BERTHOLD, D. - VOR, T. - BEESE, F. (2009): Effects of cultivating black locust (*Robinia pseudoacacia* L.) on soil chemical properties in Hungary. *Forstarchiv* 80, Heft 6 (2009), pp. 307–313. © M. & H. Schaper GmbH, ISSN 0300-4112.

BESNARD, E. - CHENU, C. - BALESDENT, J. - PUGET, P. - ARROUAYS, D. (1996): Fate of particulate organic matter in soil aggregates during cultivation. *European Journal of Soil Science*. Volume 47, Issue 4, pp. 495-503. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2389.1996.tb01849.x>

BISUTTI, I. - HILKE, I. - RAESSLER, M. (2004): Determination of total organic carbon – an overview of current methods. *TrAC - Trends in Analytical Chemistry*. Volume 23, Issues 10–11, pp. 716-726. ISSN 0165-9936. <https://doi.org/10.1016/j.trac.2004.09.003>

BLAKE, G.R. (2008): Particle Density. In: CHESWORTH, W. (ed.): *Encyclopedia of Soil Science*. Springer Dordrecht, Berlin, Heidelberg, New York. p. 504. ISBN: 978-1-4020-3994-2

BOIX-FAYOS, C. - CALVO-CASES, A. - IMESON, A.C. - SORIANOSOTO, M.D. (2001): Influence of soil properties on the aggregation of some Mediterranean soils and the use of aggregate size and stability as land degradation indicators. *Catena*. Volume 44, Issue 1, pp. 47–67. [https://doi.org/10.1016/S0341-8162\(00\)00176-4](https://doi.org/10.1016/S0341-8162(00)00176-4)

BOSSUYT, H. - SIX, J. - HENDRIX, P.F. (2005): Protection of soil carbon by microaggregates within earthworm casts. *Soil Biology and Biochemistry*. Volume 37, Issue 2, pp. 251–258. ISSN 0038-0717. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2004.07.035>

BRONICK, C.J. & LAL, R. (2005): Soil structure and management: a review. *Geoderma*. Volume 124, Issues 1–2, pp. 3–22, ISSN 0016-7061. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2004.03.005>

CHENU, C. - HASSINK, J. - BLOEM, J. (2001): Short-term changes in the spatial distribution of microorganisms in soil aggregates as affected by glucose addition. *Biology and Fertility of Soils*. Volume 34, pp. 349–356. <https://doi.org/10.1007/s003740100419>

CROW, S.E. - SWANSTON, C.W. - LAJTHA, K. - BROOKS, J. R. - KEIRSTEAD, H. (2007): Density fractionation of forest soils: methodological questions and interpretation of incubation results and turnover time in an ecosystem context. *Biogeochemistry*. Volume 85, pp. 69–90. <https://doi.org/10.1007/s10533-007-9100-8>

DAVIDSON, E.A. & ACKERMANN, I.L. (1993): Changes in soil carbon inventories following cultivation of previously untilled soils. *Biogeochemistry*. Volume 20, pp. 161–193. <https://doi.org/10.1007/BF00000786>

DEGOMEZ, T. & WAGNER, M.R. (2001): Culture and Use of Black Locust. HortTechnology. Volume 11, Issue 2, pp. 1–10. <https://doi.org/10.21273/HORTTECH.11.2.279>

DENEF, K. - SIX, J. - BOSSUYT, H. - FREY, S.D. - ELLIOTT, E.T. - MERCKX, R. - PAUSTIAN, K. (2001): Influence of dry–wet cycles on the interrelationship between aggregate, particulate organic matter, and microbial community dynamics. Soil Biology and Biochemistry. Volume 33, Issues 12–13, pp. 1599–1611. ISSN 0038-0717. [https://doi.org/10.1016/S0038-0717\(01\)00076-1](https://doi.org/10.1016/S0038-0717(01)00076-1)

DIMOYIANNIS, D. (2012): Wet aggregate stability as affected by excess carbonate and other soil properties. Land Degradation & Development. Volume 23, Issue 5, pp. 450–455. <https://doi.org/10.1002/ldr.1085>

DUNN, O. J. (1964): Multiple comparisons using rank sums. Technometrics. Volume 6, Issue 3, pp. 241–252. <https://doi.org/10.2307/1266041>

DURNER, W. - IDEN, S. C. - VON UNOLD, G. (2017), The integral suspension pressure method (ISP) for precise particle-size analysis by gravitational sedimentation, Water Resources Research. Volume 53, Issue 1, pp. 33–48. <https://doi.org/10.1002/2016WR019830>

DURNER, W. & NIEDER, R. (2005): Bodenkundliches Praktikum I. Skript. Institut für Geoökologie, Abteilung Bodenkunde und Bodenphysik, TU Braunschweig, p. 56.

EATON, E.G.S.D.J. - CAUDULLO, G. - OLIVEIRA, S. - DE RIGO, D. (2016): Quercus robur and Quercus petraea in Europe: distribution, habitat, usage and threats. In: SAN-MIGUEL-AYANZ, J. - DE RIGO, D. - CAUDULLO, G. - HOUSTON DURRANT, T. - MAURI, A. (eds.): European Atlas of Forest Tree Species. Publication Office of the European Union, Luxembourg. pp. 160–163. ISBN 978-92-79-52833-0, DOI: 10.2788/038466.

EDWARDS, L. (2013): The effects of soil freeze–thaw on soil aggregate breakdown and concomitant sediment flow in Prince Edward Island: A review. Canadian Journal of Soil Science. pp. 459–472. DOI: 10.4141/CJSS2012-059

ELLIOTT, E.T. (1986): Aggregate Structure and Carbon, Nitrogen, and Phosphorus in Native and Cultivated Soils. Soil Science Society of America Journal. Volume 50, Issue 3, pp. 627–633. <https://doi.org/10.2136/sssaj1986.03615995005000030017x>

ELLIOTT, E. T. & COLEMAN, D. C. (1988): Let the Soil Work for Us. Ecological Bulletins, no. 39, pp. 23–32. <http://www.jstor.org/stable/20112982>

EMERSON, W.W. - FOSTER, R.C. - OADES, J.M. (1986): Organo-mineral complexes in relation to soil aggregation and structure. In: HUANG, P.M. & SCHNITZER, M. (eds.): Interactions of Soil Minerals with Natural Organics and Microbes. SSSA Special Publication. Madison, Wisconsin: Soil Science Society of America. pp. 521–548. <https://doi.org/10.2136/sssaspecpub17.c14>

FATTET, M. - FU, Y. - GHESTEM, M. - MA, W. - FOULONNEAU, M. - NESPOULOUS, J.- LE BISSONNAIS, Y. - STOKES, A. (2011): Effects of vegetation type on soil resistance to erosion: Relationship between aggregate stability and shear strength. *Catena*. Volume 87, Issue 1, pp. 60–69. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2011.05.006>

FEKETE, I. - BERKI, I. - LAJTHA, K. - TRUMBORE, S. - F RANCIOSO, O. - GIOACCHINI, P. - MONTECCHIO, D. - VÁRBÍRÓ, G. - BÉNI, Á. - MAKÁDI, M. - DEMETER, I. - MADARÁSZ, B. - JUHOS, K. - KOTROCZÓ, Zs. (2021): How will a drier climate change carbon sequestration in soils of the deciduous forests of Central Europe? *Biogeochemistry*. Volume 152, pp. 13–32. <https://doi.org/10.1007/s10533-020-00728-w>

FEKETE, I. - KOTROCZÓ, Zs. - VARGA, Cs. - NAGY, P.T. - VÁRBÍRÓ, G. - BOWDEN, R.D. - TÓTH, J.A. - LAJTHA, K. (2014): Alterations in forest detritus inputs influence soil carbon concentration and soil respiration in a Central-European deciduous forest. *Soil Biology and Biochemistry*. Volume 74, pp. 106–114, ISSN 0038-0717. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2014.03.006>

FEKETE, I. - LAJTHA, K. - KOTROCZÓ, Zs. - VÁRBÍRÓ, G. - VARGA, Cs. - TÓTH, J. A. - DEMETER, I.- VEPERDI, G. - BERKI, I. (2017): Long-term effects of climate change on carbon storage and tree species composition in a dry deciduous forest. *Global Change Biology*. Volume 23, Issue 8, pp. 3154–3168. <https://doi.org/10.1111/gcb.13669>

FEKETE, I. - VARGA, C. S. - NAGY, P. T. - TÓTH, J. A., - KOTROCZÓ, Zs. (2014): Effect of detritus input on some soil nutrients concentrations in a Central European deciduous forest. In: R. KIZILKAYA, & C. GÜLSER (eds.), *Book of Proceedings 9th International Soil Science Congress on “The Soul of Soil and Civilization”*, pp. 461–467.

FELLER, C. (1997): The Concept of Soil Humus in the Past Three Centuries. In: YAALON, D. H. & BERKOWICZ, S. (eds.), *History of soil science, International perspectives. Advances in geoecology*. Volume 29, pp. 15–46. Catena-Verlag, Reiskirchen. ISBN 978-3-923381-40-1

GHEZZEHEI, T.A. (2012): Soil Structure. In: HUANG, P.M. - LI, Y. - SUMNER, M.E. (eds.): *Handbook of Soil Sciences*. 2nd edition, Vol. 1: Properties and Processes. CRC Press (Taylor & Francis), Boca Raton, FL, pp.2.1-2.17. ISBN 978-1439803059 <https://doi.org/10.1017/S0014479712000609>

GODBOLD, D.L. - HOOSBEEK, M.R. - LUKAC, M. - COTRUFO, M.F. - JANSSENS, I.A. - CEULEMANS, R. - POLLE, A. - VELTHORST, E.J. - SCARASCIA-MUGNOZZA, G. - ANGELIS, P. - MIGLIETTA, F. - PERESSOTTI, A. (2006): Mycorrhizal hyphal turnover as a dominant process for carbon input into soil organic matter. *Plant and Soil*. Volume 281, pp. 15–24. <https://doi.org/10.1007/s11104-005-3701-6>

GOLCHIN, A - OADES, J.M. - SKJEMSTAD, J.O. - CLARKE, P. (1994): Study of free and occluded particulate organic matter in soils by solid state <sup>13</sup>C Cp/MAS NMR spectroscopy and scanning electron microscopy. *Soil Research*. Volume 32, pp.285-309. (módszertani leírás)

GRÜNEBERG, E. - SCHÖNING, I. - HESSENMÖLLER, D. - SCHULZE, E.-D. - WEISSER, W.W. (2013): Organic layer and clay content control soil organic carbon stocks in density fractions of differently managed German beech forests. *Forest Ecology and Management*. Volume 303, pp. 1-10. ISSN 0378-1127. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2013.03.014>

HARTIG, F. (2022): DHARMa: Residual Diagnostics for Hierarchical (Multi-Level/Mixed) Regression Models. R package version 0.4.5. <https://CRAN.R-project.org/package=DHARMa>

HARRISON, A.F. (1971): The inhibitory effect of oak leaf litter tannins on the growth of fungi, in relation to litter decomposition. *Soil Biology and Biochemistry*. Volume 3, Issue 3, pp. 167-172. ISSN 0038-0717. [https://doi.org/10.1016/0038-0717\(71\)90011-3](https://doi.org/10.1016/0038-0717(71)90011-3)

HARTGE, K.H. & HORN, R. (1999): Einführung in die Bodenphysik. Ferdinand Enke Verlag, Stuttgart. 3. überarbeitete Auflage, pp. 304. ISBN 3432896832.

HARTMANN, P. (2008): Aggregation. In: CHESWORTH, W. (ed.): *Encyclopedia of Soil Science*. Springer Dordrecht, Berlin, Heidelberg, New York. pp. 30–32. ISBN: 978-1-4020-3994-2

HASSINK, J. (1997): The capacity of soils to preserve organic C and N by their association with clay and silt particles. *Plant and Soil*. Volume 191, pp. 77–87. <https://doi.org/10.1023/A:1004213929699>

HAYNES, R. (2000): Interactions between soil organic matter status, cropping history, method of quantification and sample pretreatment and their effects on measured aggregate stability. *Biology and Fertility of Soils*. Volume 30, pp. 270–275. <https://doi.org/10.1007/s003740050002>

HEDGES, J.I. - EGLINTON, G. - HATCHER, P.G. - KIRCHMAN, D.L. - ARNOSTI, C. - DERENNE, S. - EVERSHERD, R.P. - KÖGEL-KNABNER, I. - DE LEEUW, J.W. - LITCKE, R. - MICHAELIS, W. - RULLKÖTTER, J. (2000): The molecularly-uncharacterized component of nonliving organic matter in natural environments. *Organic Geochemistry*. Volume 31, Issue 10, pp. 945–958. ISSN 0146-6380. [https://doi.org/10.1016/S0146-6380\(00\)00096-6](https://doi.org/10.1016/S0146-6380(00)00096-6)

HENTSCHEL, M.L. & PAGE, N.W. (2003): Selection of descriptors for particle shape characterization. *Particle & Particle Systems Characterization*. Volume 20, Issue 1, pp. 25–38. <https://doi.org/10.1002/ppsc.200390002>

HILDEBRANDT, E.E. (1994): The heterogeneous distribution of mobile ions in the rhizosphere of acid forest soils: Facts, causes and consequences. *Journal of Environmental Science and Health. Part A: Environmental Science and Engineering and Toxicology*, Volume 29, Issue 9, pp. 1973–1992. <https://doi.org/10.1080/10934529409376159>

HILLEL, D. (2004): *Introduction to Environmental Soil Physics*. Elsevier Academic Press, San Diego, CA. p. 73. ISBN 0-12-348655-6.

HUGGETT, R.J. (1998): Soil chronosequences, soil development, and soil evolution: a critical review. *Catena*. Volume 32, Issues 3–4, pp. 155–172, ISSN 0341-8162. [https://doi.org/10.1016/S0341-8162\(98\)00053-8](https://doi.org/10.1016/S0341-8162(98)00053-8).

IGAZ, D. - AYDIN, E. - ŠINKOVIČOVÁ, M. - ŠIMANSKÝ, V. - TALL, A. - HORÁK, J. (2020): Laser diffraction as an innovative alternative to standard pipette method for determination of soil texture classes in Central Europe. *Water*. Volume 12, Issue 5, Nr. 1232. <https://doi.org/10.3390/w12051232>

IUSS Working Group WRB (2015): *World Reference Base for Soil Resources 2014, update 2015 International soil classification system for naming soils and creating legends for soil maps*. World Soil Resources Reports No. 106. FAO, Rome. ISBN 978-92-5-108369-7.

ISO 9276-1:2004-09. *Darstellung der Ergebnisse von Partikelgrößenanalysen - Teil 1: Grafische Darstellung*.

ISO 10390:2005. *Soil quality - Determination of pH*.

ISO 10694:1996-08. *Soil quality - Determination of organic and total carbon after dry combustion (elementary analysis)*.

ISO 10930:2012. *Soil quality — Measurement of the stability of soil aggregates subjected to the action of water*.

ISO 11277:1998. Soil quality - Determination of particle size distribution in mineral soil material - Method by sieving and sedimentation. (ISO 11277:1998 Corrigendum 1:2002)

ISO 11464:2006-07. Soil quality - Pretreatment of samples for physico-chemical analysis.

ISO 13320:2020. Particle size analysis - Laser diffraction methods.

ISO 13322-2:2021-12. Particle size analysis - Image analysis methods - Part 2: Dynamic image analysis methods.

ISO 14488:2007. Particulate materials - Sampling and sample splitting for the determination of particulate properties.

JAHN, R. - BLUME, H.-P. - ASIO, V.B. - SPAARGAREN, O. - SCHAD, P. (2006): Guidelines for soil description (4th ed.). Rome: FAO. pp. 44–48. ISBN 92-5-105521-1.

JAKAB, G. - DOBOS, E. - MADARÁSZ, B. - SZALAI, Z. - SZABÓ, J.A. (2019): Spatial and Temporal Changes in Infiltration and Aggregate Stability: A Case Study of a Subhumid Irrigated Cropland. Water. Volume 11, Issue 5, No. 876. <https://doi.org/10.3390/w11050876>

JAKAB, G. - SZABÓ, J. - SZALAI, Z. - MÉSZÁROS, E. - MADARÁSZ, B. - CENTERI, CS. - SZABÓ, B. - NÉMETH, T. - SIPOS, P. (2016): Changes in organic carbon concentration and organic matter compound of erosion-delivered soil aggregates. Environmental Earth Sciences. Volume 75, No. 144, pp. 1–11. <https://doi.org/10.1007/s12665-015-5052-9>

JANDL, R. - LINDNER, M. - VESTERDAL, L. - BAUWENS, B. - BARITZ, R. - HAGEDORN, F. - JOHNSON, D.W. - MINKKINEN, K. - BYRNE, K.A. (2007): How strongly can forest management influence soil carbon sequestration? Geoderma. Volume 137, Issues 3–4, pp. 253–268. ISSN 0016-7061, <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2006.09.003>

JASTROW, J.D. & MILLER, R.M. (1996): Soil aggregate stabilization and carbon sequestration: Feedbacks through organomineral associations. Argonne National Lab. (ANL), Argonne, IL (United States). OSTI Identifier: 464188, DOE Contract Number: W-31109-ENG-38.

JÁRÓ Z. (1986): Az egyes termőhelytípus-változatokon alkalmazható célállományok és azok várható növekedése. In: Kódjegyzékek az Erdőtervezési útmutatóhoz. MÉM Erdőrendezési Szolgálat kiadása, Budapest.

JENNE, J. (2020): Bodenstruktur und Kohlenstoffhaushalt von Waldböden – Einfluss von Verschiedenen Baumarten. Bachelorarbeit. Fakultät für Umwelt und Natürliche Ressourcen, Albert-Ludwigs-Universität Freiburg.



- 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*. Volume 128, Issues 1–2, pp. 63–79. ISSN 0016-7061. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2004.12.013>
- JOHNSON, D.W. & CURTIS, P.S. (2001): Effects of forest management on soil C and N storage: meta analysis. *Forest Ecology and Management*. Volume 140, Issues 2–3, pp. 227–238. ISSN 0378-1127, [https://doi.org/10.1016/S0378-1127\(00\)00282-6](https://doi.org/10.1016/S0378-1127(00)00282-6)
- JOHNSON, E.A. & MIYANISHI, K. (2007): *Plant disturbance ecology: the process and the response*. Academic Press. p. 5. ISBN 978-0-12-088778-1.
- JOLY, F.-X. - MILCU, A. - SCHERER-LORENZEN, M. - JEAN, L.-K. - BUSSOTTI, F. - DAWUD, S.M. - MÜLLER, S. - POLLASTRINI, M. - RAULUND-RASMUSSEN, K. - VESTERDAL, L. - HÄTTENSCHWILER, S. (2017): Tree species diversity affects decomposition through modified micro-environmental conditions across European forests. *New Phytologist*. Volume 214, Issue 3 pp. 1281–1293. <https://doi.org/10.1111/nph.14452>
- JUHOS, K. - MADARÁSZ, B. - KOTROCZÓ, ZS. - BÉNI, Á. - MAKÁDI, M. - FEKETE, I. (2021): Carbon sequestration of forest soils is reflected by changes in physicochemical soil indicators. — A comprehensive discussion of a long-term experiment on a detritus manipulation. *Geoderma*. Volume 385, Article 114918. ISSN 0016-7061, <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2020.114918>
- KAISER, K., - EUSTERHUES, K., - RUMPEL, C., - GUGGENBERGER, G. - KÖGEL-KNABNER, I. (2002): Stabilization of organic matter by soil minerals - investigations of density and particle-size fractions from two acid forest soils. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*. Volume 165, Issue 4, pp. 451–459. [https://doi.org/10.1002/1522-2624\(200208\)165:4<451::AID-JPLN451>3.0.CO;2-B](https://doi.org/10.1002/1522-2624(200208)165:4<451::AID-JPLN451>3.0.CO;2-B)
- KAISER, K. & GUGGENBERGER, G. (2000): The role of DOM sorption to mineral surfaces in the preservation of organic matter in soils. *Organic Geochemistry*. Volume 31, Issues 7–8, pp. 711–725. ISSN 0146-6380. [https://doi.org/10.1016/S0146-6380\(00\)00046-2](https://doi.org/10.1016/S0146-6380(00)00046-2)
- KASSAMBARA, A. (2021): *rstatix: Pipe-Friendly Framework for Basic Statistical Tests*. R package version 0.7.0. <https://CRAN.R-project.org/package=rstatix>
- KAY, B.D. (1998): Soil structure and organic carbon: a review. In: LAL, R., KIMBLE, J.M., FOLLETT, R.F., STEWART, B.A. (eds.): *Soil Processes and the Carbon Cycle*. CRC Press, Boca Raton, 1st ed., pp. 169–197. ISBN 978-0-2037-3927-3 URL: <https://doi.org/10.1201/9780203739273>



KAYSER, G. (2014): Round robin test on disaggregation of soil samples: controls of ultrasound efficiency. Master Thesis. Chair for Soil Ecology, Faculty of Environment and Natural Resources, Albert–Ludwigs–University Freiburg.

KAYSER, G. - GRAF-ROSENFELLNER, M. - SCHACK-KIRCHNER, H. - LANG, F. (2019): Dynamic imaging provides novel insight into the shape and stability of soil aggregates. *European Journal of Soil Science*. Volume 70, pp. 454–465. <https://doi.org/10.1111/ejss.12796>

KIM, J. & CROWLEY, D.E. (2013): Size fractionation and microbial community structure of soil aggregates. *Journal of Agricultural Chemistry and Environment*. Volume 2, No. 4, pp. 75–80. <http://dx.doi.org/10.4236/jacen.2013.24011>

KOTROCZÓ, ZS. - JUHOS, K. - BIRÓ, B. - KOCSIS, T. - PABAR, S.A. - VARGA, C. - FEKETE, I. (2020): Effect of Detritus Manipulation on Different Organic Matter Decompositions in Temperate Deciduous Forest Soils. *Forests*. Volume 11, Issue 6, No. 675. <https://doi.org/10.3390/f11060675>

KÖGEL-KNABNER, I. - GUGGENBERGER, G. - KLEBER, M. - KANDELER, E. - KALBITZ, K. - SCHEU, S. - EUSTERHUES, K. - LEINWEBER, P. (2008): Organo-mineral associations in temperate soils: Integrating biology, mineralogy, and organic matter chemistry. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*. Volume 171, Issue 1, pp. 61–82. <https://doi.org/10.1002/jpln.200700048>

KÖNIG, N. - BLUM, U. - SYMOSSEK, F. (2005): *Handbuch forstliche Analytik (HFA). Eine Loseblatt-Sammlung der Analysemethoden im Forstbereich (5. Ergänzung 2014)*. Göttingen, Gutachterausschuss Forstliche Analytik.

KUHN, M.(2021): caret: Classification and Regression Training. R package version 6.0–90. URL: <https://CRAN.R-project.org/package=caret>

KUN, Á. - KATONA, O. - SIPOS, GY. - BARTA, K. (2013): Comparison of pipette and laser diffraction methods in determining the granulometric content of fluvial sediment samples. *Journal of Environmental Geography*. Volume 6, Issues 3–4, pp. 49–54. <https://doi.org/10.2478/jengeo-2013-0006>

KURÁŽ, V. - FROUZ, J. - KURÁŽ, M. - MAKO, A. - SHUSTR, V. - CEJPEK, J. - ROMANOV, O. V. - ABAKUMOV, E. V. (2012): Changes in some physical properties of soils in the chronosequence of self-overgrown dumps of the Sokolov quarry-dump complex, Czechia. *Eurasian Soil Science*. Volume 45, pp. 266–272. <https://doi.org/10.1134/S1064229312030076>

- LABANCZ, V. - BARNA, GY. - SZEGI, T. - MAKÓ, A. (2021): A talajok aggregátum-stabilitásának vizsgálati lehetőségei I. Makroaggregátum-stabilitás., In: RAJKAI, K. (ed.): Agrokémia és Talajtan. 70. kötet, 1. szám, pp. 87–109. <https://doi.org/10.1556/0088.2021.00092>
- LAL, R. (2005): Forest soils and carbon sequestration. *Forest Ecology and Management*. Volume 220, Issues 1–3, pp. 242–258. ISSN 0378-1127, <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2005.08.015>
- 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*. Volume 26, pp. 261–273. <https://doi.org/10.1111/gcb.14859>
- LEHMANN, J. - KINYANGI, J. - SOLOMON, D. (2007): Organic matter stabilization in soil microaggregates: implications from spatial heterogeneity of organic carbon contents and carbon forms. *Biogeochemistry*. Volume 85, pp. 45–57. <https://doi.org/10.1007/s10533-007-9105-3>
- LI, K. - HAN, X. - NI, R. - SHI, G. - DE-MIGUEL, S. - LI, C. - SHEN, W. - ZHANG, Y. - ZHANG, Y. (2021): Impact of Robinia pseudoacacia stand conversion on soil properties and bacterial community composition in Mount Tai, China. *Forest Ecosystems*. Volume 8, Issue 19, pp. 1–12. <https://doi.org/10.1186/s40663-021-00296-x>
- LINQUIST, B.A. - SINGLETON, P.W. - YOST, R.S. - CASSMAN, K.G. (1997): Aggregate size effects on the sorption and release of phosphorus in an ultisol. *Soil Science Society of America Journal*. Volume 61, Issue 1, pp. 160–166. <https://doi.org/10.2136/sssaj1997.03615995006100010024x>
- LOBE, I. - SANDHAGE-HOFMANN, A. - BRODOWSKI, S. - DU PREEZ, C.C. - AMELUNG, W. (2011): Aggregate dynamics and associated soil organic matter contents as influenced by prolonged arable cropping in the South African Highveld. *Geoderma*. Volume 162, Issues 3–4, pp. 251–259. ISSN 0016-7061. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2011.02.001>
- LÜDECKE, D. - BEN-SHACHAR, M.S. - PATIL, I. - WAGGONER, P. - MAKOWSKI, D. (2021): performance: An R Package for Assessment, Comparison and Testing of Statistical Models. *Journal of Open Source Software*. Volume 6, No. 60, p. 3139. <https://doi.org/10.21105/joss.03139>
- LÜTZOW, M.V., KÖGEL-KNABNER, I., EKSCHMITT, K., MATZNER, E., GUGGENBERGER, G., MARSCHNER, B. - FLESSA, H. (2006): Stabilization of organic matter in temperate soils: mechanisms and their relevance under different soil conditions – a review. *European Journal of Soil Science*. 57 pp. 426–445. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2389.2006.00809.x>

LYNCH, J.M. - BRAGG, E. (1985): Microorganisms and Soil Aggregate Stability. In: STEWART, B.A. (ed.): *Advances in Soil Science*. Volume 2, pp. 133–171. Springer, New York. ISBN 978-1-4612-9558-7 [https://doi.org/10.1007/978-1-4612-5088-3\\_3](https://doi.org/10.1007/978-1-4612-5088-3_3)

MAKÓ, A. & HERNÁDI, H. (2010): A talajok szemcseösszetételének vizsgálata során alkalmazott különböző előkészítési módszerek összehasonlító értékelése. In: TÖRÖK, Á. & VÁSÁRHELYI, B. (ed.): *Mérnökgeológia-Kőzetmechanika*. Hantken Kiadó, Budapest. pp. 101–108.

MAKÓ, A. - HERNÁDI, H. - BARNA, GY. - BALÁZS, R. - MOLNÁR, S. - LABAN CZ, V. - TÓTH, B. - BAKACSI, ZS. (2017): A talajok mechanikai összetétel vizsgálata pipettás ülepíté ses módszerrel: a hazai és a nemzetközi szabvány szerinti eljárások összehasonlítása és konverziója. In: RAJKAI, K. (ed.): *Agrokémia és Talajtan*. 66. kötet, 2. szám, pp. 295–315. <https://doi.org/10.1556/0088.2017.66.2.1>

MAKÓ, A. - TÓTH, G. - WEYNANTS, M. - RAJKAI, K. - HERMANN, T. - TÓTH, B. (2017b): Pedotransfer functions for converting laser diffraction particle-size data to conventional values. *European Journal of Soil Science*. Volume 68, Issue 5, pp. 769–782. <https://doi.org/10.1111/ejss.12456>

MAKÓ, A. - VARGA, T. - HERNÁDI, H. - LABAN CZ, V. - BARNA, GY. (2017c): Talajminták lézeres szemcseanalízisének módszertani tapasztalatai. In: RAJKAI, K. (ed.): *Agrokémia és Talajtan*. 66. kötet, 1. szám, pp. 223–250. <https://doi.org/10.1556/0088.2017.66.1.13>

MANTOVANI, D. - VESTE, M. - BOLDT-BURISCH, K. - FRITSCH, S. - KONING, L. - FREESE, D. (2015): Carbon allocation, nodulation, and biological nitrogen fixation of black locust (*Robinia pseudoacacia* L.) under soil water limitation. *Annals of Forest Research*. Volume 58, Issue 2 pp. 259–274. <https://doi.org/10.15287/afr.2015.420>

MARTIN, J.P. - MARTIN, W.P. - PAGE, J.B. - RANEY, W.A. - DE MENT, J.D. (1955): Soil Aggregation. *Advances in Agronomy*. Volume 7, pp. 1–37. A.G. Norman (ed.). Academic Press. ISSN 0065-2113, ISBN 9780120007073. [https://doi.org/10.1016/S0065-2113\(08\)60333-8](https://doi.org/10.1016/S0065-2113(08)60333-8)

MÁTRA, Z.S.- HEIL, B. - KOVÁCS, G. - LANG, F. - SCHACK-KIRCHNER, H. (2022): Increased accuracy and precision of hydrometric soil texture measurements (“Pario classic method”) with semi-empiric correction functions. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*. Volume 185, Issue 3, pp. 417–426. <https://doi.org/10.1002/jpln.202100213>

MAYER, L.M. (1994): Relationships between mineral surfaces and organic carbon concentrations in soils and sediments. *Chemical Geology*. Volume 114, Issues 3–4, pp. 347–363, ISSN 0009-2541. [https://doi.org/10.1016/0009-2541\(94\)90063-9](https://doi.org/10.1016/0009-2541(94)90063-9)

MERKUS, H.G. (2009): Particle Size Measurements: Fundamentals, Practice, Quality. Particle Technology Series. Volume 17, p. 534. Springer Netherlands. ISBN 978-1-4020-9015-8.

MEURER, K. - BARRON, J. - CHENU, C. - COUCHENEY, E. - FIELDING, M. - HALLETT, P. - HERRMANN, A.M. - KELLER, T. - KOESTEL, J. - LARSBO, M. - LEWAN, E. - OR, D. - PARSONS, D. - PARVIN, N. - TAYLOR, A. - VEREECKEN, H. - JARVIS, N. (2020): A framework for modelling soil structure dynamics induced by biological activity. *Global Change Biology*. Volume 26, pp. 5382–5403. <https://doi.org/10.1111/gcb.15289>

MUMMEY, D. & STAHL, P. (2004): Analysis of soil whole- and inner-microaggregate bacterial communities. *Microbial Ecology*. Volume 48, pp. 41–50. <https://doi.org/10.1007/s00248-003-1000-4>

OADES, J.M. (1984): Soil organic matter and structural stability: mechanisms and implications for management. *Plant and Soil*. Volume 76, pp. 319–337. <https://doi.org/10.1007/BF02205590>

OADES, J.M. (1993): The role of biology in the formation, stabilization and degradation of soil structure. *Geoderma*. Volume 56, Issues 1–4, pp. 377–400. ISSN 0016-7061, [https://doi.org/10.1016/0016-7061\(93\)90123-3](https://doi.org/10.1016/0016-7061(93)90123-3)

OADES, J.M. & WATERS, A.G. (1991): Aggregate hierarchy in soils. *Australian Journal of Soil Research*. Volume 29, Issue 6, pp. 815–828. ISSN: 0004-9573, <https://doi.org/10.1071/SR9910815>

PAN, Y. - BIRDSEY, R.A. - FANG, J. - HOUGHTON, R. - KAUPPI, P.E. - KURZ, W.A. - PHILLIPS, O.L. - SHVIDENKO, A. - LEWIS, S.L. - CANADELL, J.G. - CIAIS, P. - JACKSON, R.B. - PACALA, S.W. - MCGUIRE, A.D. - PIAO, S. - RAUTIAINEN, A. - SITCH, S. - HAYES, D. (2011): A large and persistent carbon sink in the world's forests. *Science*. Volume 333, Issue 6045, pp. 988–993. <https://doi.org/10.1126/science.1201609>

PENG, X. - HORN, R. - HALLETT, P. (2015): Soil structure and its functions in ecosystems: Phase matter & scale matter. *Soil and Tillage Research*. Volume 146, Part A, pp. 1–3. ISSN 0167-1987. <https://doi.org/10.1016/j.still.2014.10.017>

PETERSON, R. A. (2021): Finding Optimal Normalizing Transformations via bestNormalize. *The R Journal*. Volume 13:1, pp. 310–329. DOI: 10.32614/RJ-2021-041.

PLAZA, C. - GIANNETTA, B. - BENAVENTE, I. - VISCHETTI, C. - ZACCONE, C. (2019): Density-based fractionation of soil organic matter: effects of heavy liquid and heavy fraction washing. *Scientific Reports*. Volume 9, No. 10146. <https://doi.org/10.1038/s41598-019-46577-y>

POST, W.M. & MANN, L.K. (1990): Changes in soil organic carbon and nitrogen as a result of cultivation. In: BOUWMAN, A.F. (ed.): Soils and the Greenhouse Effect. John Wiley & Sons: New York, NY, USA. pp. 401–406. DOI: 10.3334/CDIAC/tcm.006

PUGET, P. - CHENU, C. - BALESSENT, J. (2000): Dynamics of soil organic matter associated with particle-size fractions of water-stable aggregates. European Journal of Soil Science. Volume 51, Issue 4, pp. 595–605. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2389.2000.00353.x>

R Core Team (2021): R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. URL: <https://www.R-project.org/>

RStudio Team (2021): RStudio: Integrated Development Environment for R. RStudio, PBC, Boston, MA. URL: <http://www.rstudio.com/>

ROSS, D.J. - TATE, K.R. - SCOTT, N.A. - WILDE, R.H. - RODDA, N.J. - TOWNSEND, J.A. (2002): Afforestation of pastures with *Pinus radiata* influences soil carbon and nitrogen pools and mineralisation and microbial properties. Australian Journal of Soil Research. Volume 40, pp. 1303–1318. <https://doi.org/10.1071/SR02020>

RUMPEL, C. - EUSTERHUES, K. - KÖGEL-KNABNER, I. (2003): Location and chemical composition of stabilized organic carbon in topsoil and subsoil horizons of two acid forest soils. Soil Biology and Biochemistry. Volume 36, Issue 1, pp. 177–190. ISSN 0038-0717, <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2003.09.005>

SARKHOT, D.V. - COMERFORD, N.B. - JOKELA, E.J. - REEVES, J.B. - HARRIS, W.G. (2007): Aggregation and aggregate carbon in a forested Southeastern coastal plain Spodosol. Soil Science Society of America Journal. Volume 71, pp. 1779–1787. <https://doi.org/10.2136/sssaj2006.0340>

SCHACK-KIRCHNER, H. - WILPERT, K.V. - HILDEBRAND, E.E. (2000): The spatial distribution of soil hyphae in structured spruce-forest soils. Plant and Soil. Volume 224, pp. 195–205. <https://doi.org/10.1023/A:1004806122105>

SCHÖNING, I. & KÖGEL-KNABNER, I. (2006): Chemical composition of young and old carbon pools throughout Cambisol and Luvisol profiles under forests. Soil Biology and Biochemistry. Volume 38, Issue 8, pp. 2411–2424. ISSN 0038-0717. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2006.03.005>

SCHULTE, P. - LEHMKUHL, F. - STEININGER, F. - LOIBL, D. - LOCKOT, G. - PROTZE, J. - FISCHER, P. - STAUCH, G. (2015): Influence of HCl pretreatment and organo-mineral complexes on laser diffraction measurement of loess–paleosol-sequences. Catena. Volume 137, pp. 392–405. ISSN 0341-162. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2015.10.015>

SILVER, W.L. - OSTERTAG, R. - LUGO, A.E. (2000): The Potential for Carbon Sequestration Through Reforestation of Abandoned Tropical Agricultural and Pasture Lands. *Restoration Ecology*. Volume 8, pp. 394–407. <https://doi.org/10.1046/j.1526-100x.2000.80054.x>

SIX, J. - BOSSUYT, H. - DEGRYZE, S. - DENEFF, K. (2004). A history of research on the link between (micro)aggregates, soil biota, and soil organic matter dynamics. *Soil and Tillage Research*. Volume 79, Issue 1, pp. 7–31. <https://doi.org/10.1016/j.still.2004.03.008>

SIX, J. - ELLIOTT, E., - PAUSTIAN, K. (2000). Soil structure and soil organic matter II. A normalized stability index and the effect of mineralogy. *Soil Science Society of America Journal*. pp. 1042–1049. <https://doi.org/10.2136/sssaj2000.6431042x>

SIX, J. - FELLER, C. - DENEFF, K. - OGLE, S.M. - DE MORAES, J.C. - ALBRECHT, A. (2002): Soil organic matter, biota and aggregation in temperate and tropical soils - Effects of no-tillage. *Agronomie*. Volume 22, pp. 755–775. DOI: 10.1051/agro

SMITH, P. - COTRUFO, M.F. - RUMPEL, C. - PAUSTIAN, K. - KUIKMAN, P.J. - ELLIOTT, J.A. - McDOWELL, R. - GRIFFITHS, R.I. - ASAKAWA, S. - BUSTAMANTE, M. - HOUSE, J.I. - SOBOCKÁ, J. - HARPER, R. - PAN, G. - WEST, P.C. - GERBER, J.S. - CLARK, J.M. - ADHYA, T. - SCHOLES, R.J. - SCHOLES, M. C. (2015): Biogeochemical cycles and biodiversity as key drivers of ecosystem services provided by soils, *Soil*. Volume 1, pp. 665–685. <https://doi.org/10.5194/soil-1-665-2015>

SPONAGEL, H. - GROTTENTHALER, W. - HARTMANN, K.-J. - HARTWICH, R. - JANETZKO, P. - JOISTEN, H. - KÜHN, D. - SABEL, K.-J. - TRIDL, R. (2005): Ad-hoc-Arbeitsgruppe Boden: Bodenkundliche Kartieranleitung (KA-5). Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe und Geologische Landesämter der Bundesrepublik Deutschland (Hrsg.). Schweitzerbart'sche Verlagsbuchhandlung, Stuttgart, Germany.

STAHR, S.E. (2019): Aggregate und organische Bodensubstanz: Verteilung und Dynamik von C, N und P in Waldböden. Inaugural-Dissertation zur Erlangung der Doktorwürde der Fakultät für Umwelt und Natürliche Ressourcen der Albert-Ludwigs-Universität Freiburg.

STIEß, M. (2009): Partikelmesstechnik. In: *Mechanische Verfahrenstechnik - Partikeltechnologie 1*. Springer-Lehrbuch. Springer, Berlin, Heidelberg. pp. 161-260. [https://doi.org/10.1007/978-3-540-32552-9\\_5](https://doi.org/10.1007/978-3-540-32552-9_5)

SWIFT, R. S. (2001): Sequestration of carbon by soil. *Soil Science*. Volume 166, Issue 11, pp. 858–871. <https://doi.org/10.1097/00010694-200111000-00010>

TISDALL, J.M. & OADES, J.M. (1982): Organic matter and water-stable aggregates in soils. *Journal of Soil Science*. Volume 33, Issue 2, pp. 141–163. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2389.1982.tb01755.x>

TOMCZAK, M. & TOMCZAK, E. (2014): The need to report effect size estimates revisited. An overview of some recommended measures of effect size. *Trends in Sport Sciences*. Issue 1, Volume 21, pp. 19–25. ISSN 2299-9590.

TOTSCHKE, K.U. - AMELUNG, W. - GERZABEK, M.H. - GUGGENBERGER, G. - KLUMPP, E. - KNIEF, C. - LEHNDORFF, E. - MIKUTTA, R. - PETH, S. - PRECHTEL, A. - RAY, N. - KÖGEL-KNABNER, I. (2018): Microaggregates in soils. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*. Volume 181, Issue 1, pp. 104–136. <https://doi.org/10.1002/jpln.201600451>

USDA Handbook, (2017). Soil Science Division Staff: Soil survey manual, 18. edition. DITZLER, C. - SCHEFFE, K. - MONGER, H.C. (eds.). Government Printing Office, Washington, D.C.

VIRTO, I. - GARTZIA-BENGOETXEA, N. - FERNÁNDEZ-UGALDE, O. (2011): Role of Organic Matter and Carbonates in Soil Aggregation Estimated Using Laser Diffractometry. *Pedosphere*. Volume 21, Issue 5, pp. 566–572. ISSN 1002-0160. [https://doi.org/10.1016/S1002-0160\(11\)60158-6](https://doi.org/10.1016/S1002-0160(11)60158-6)

WALKER, L.R. - WARDLE, D.A. - BARDGETT, R.D. - CLARKSON, B.D. (2010): The use of chronosequences in studies of ecological succession and soil development. *Journal of Ecology*. Volume 98, pp. 725–736. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2745.2010.01664.x>

WAGAI, R. - MAYER, L.M. - KITAYAMA, K. - KNICKER, H. (2008): Climate and parent material controls on organic matter storage in surface soils: A three-pool, density-separation approach. *Geoderma*. Volume 147, Issues 1–2, pp. 23–33. ISSN 0016-7061, <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2008.07.010>

WELCH, B.L. (1951): On the Comparison of Several Mean Values: An Alternative Approach. *Biometrika*. Volume 38, No. 3/4, pp. 330–36. JSTOR, <https://doi.org/10.2307/2332579>

WERNER, F.- MUELLER, C.W. - THIEME, J. - GIANONCELLI, A. - RIVARD, C. - HÖSCHEN, C. - PRIETZEL, J. (2017): Micro-scale heterogeneity of soil phosphorus depends on soil substrate and depth. Springer Nature, *Scientific Reports*. Volume 7, No. 3203. <https://doi.org/10.1038/s41598-017-03537-8>

WICKHAM, H. (2016): *ggplot2: Elegant Graphics for Data Analysis*. Springer-Verlag New York. URL: <https://ggplot2.tidyverse.org>



WICKHAM, H. - AVERICK, M. - BRYAN, J. - CHANG, W. - D'AGOSTINO MCGOWAN, L. - FRANÇOIS, R. - GROLEMUND, G. - HAYES, A. - HENRY, L. - HESTER, J. - KUHN, M. - LIN PEDERSEN, T. - MILLER, E. - MILTON BACHE, S. - MÜLLER, K. - OOMS, J. - ROBINSON, D. - SEIDEL, D.P. - SPINU, V. - TAKAHASHI, K. - VAUGHAN, D. - WILKE, C. - WOO, K. - YUTANI, H. (2019): Welcome to the tidyverse. *Journal of Open Source Software*. Volume 4, No. 43, p. 1686. <https://doi.org/10.21105/joss.01686>

YAMASHITA, T. - FLESSA, H. - JOHN, B. - HELFRICH, M. - LUDWIG, B. (2006): Organic matter in density fractions of water-stable aggregates in silty soils: Effect of land use. *Soil Biology and Biochemistry*. Volume 38, Issue 11, pp. 3222–3234. ISSN 0038-0717, <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2006.04.013>

ZIMMERMANN, M. - LEIFELD, J. - SCHMIDT, M.W.I. - SMITH, P. - FUHRER, J. (2007): Measured soil organic matter fractions can be related to pools in the RothC model. *European Journal of Soil Science*. Volume 58, pp. 658–667. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2389.2006.00855.x>



## 11. Függelék

F1. a-h. táblázatok. A mintaterületek adatai (erdőrészeletlapól és a GPS-koordináták).

Helység, tag/részlet	Somogytúr 46/O
Tengerszint feletti magasság	150–250 m
Termőhelytípus-változat, WRB- besorolás	KTT-TVFLEN-BFÖLD-KMÉ-V Cambisol
Állományjellemzők	mag eredetű, 100% elegyarányú akác telepítés
Átlagéletkor	12 év
GPS-koordináták	N46° 40.058' E17° 44.818' ; 242 m tszf.

Helység, tag/részlet	Somogytúr 12/B
Tengerszint feletti magasság	150–250 m
Termőhelytípus-változat, WRB- besorolás	GYT-TVFLEN-BFÖLD-KMÉ-V Cambisol
Állományjellemzők	gyökérsarj eredetű, 100% elegyarányú akác (utolsó használat 18 éve)
Átlagéletkor	36 év
GPS-koordináták	N46° 42.279' E17° 43.507' ; 233 m tszf.

Helység, tag/részlet	Koppányszántó 31/A
Tengerszint feletti magasság	150–250 m
Termőhelytípus-változat, WRB- besorolás	KTT-TVFLEN-BFÖLD-KMÉ-V Cambisol
Állományjellemzők	mag eredetű 80% kocsánytalan tölgy, 20% csertölgy telepítés
Átlagéletkor	8 év
GPS-koordináták	N46° 38.705' E18° 06.680' ; 201 m tszf.

Helység, tag/részlet	Balatonszemes 5/C
Tengerszint feletti magasság	150–250 m
Termőhelytípus-változat, WRB- besorolás	KTT-TVFLEN-BFÖLD-MÉ-V Cambisol
Állományjellemzők	mag eredetű 100% elegyarányú kocsánytalan tölgyes (utolsó használat 3 éve: egészségügyi fakitermelés)
Átlagéletkor	114 év
GPS-koordináták	N46° 46.459' E17° 47.527' ; 188 m tszf.

Helység, tag/részlet	Vizslás 8/G
Tengerszint feletti magasság	250–350 m
Termőhelytípus-változat, WRB- besorolás	KTT-TVFLEN-BFÖLD-KMÉ-V Cambisol (Calcisol?)
Állományjellemzők	mag eredetű 100% elegyarányú akác telepítés (a felvétel évében tözskiválasztó gyérítés történt)
Átlagéletkor	21 év
GPS-koordináták	N48° 01.901' E19° 47.876' ; 289 m tszf.

Helység, tag/részlet	Szirák 8/E
Tengerszint feletti magasság	150–250 m
Termőhelytípus-változat,	KTT-TVFLEN-BFÖLD-MÉ-V
WRB- besorolás	Cambisol
Állományjellemzők	gyökérsarj eredetű 100% elegyarányú akácos (utolsó használat 8 éve: tisztítás)
Átlagéletkor	23 év
GPS-koordináták	N47° 50.007' E19° 30.221' ; 243 m tszf.

Helység, tag/részlet	Tolmács 16/E
Tengerszint feletti magasság	150–250 m
Termőhelytípus-változat,	KTT-TVFLEN-BFÖLD-KMÉ-V
WRB- besorolás	Cambisol
Állományjellemzők	mag eredetű 100% kocsánytalan tölgy telepítés
Átlagéletkor	12 év
GPS-koordináták	N47° 55.359' E19° 07.031' ; 245 m tszf.

Helység, tag/részlet	Nógrád 51/E
Tengerszint feletti magasság	150–250 m
Termőhelytípus-változat,	KTT-TVFLEN-BFÖLD-MÉ-V
WRB- besorolás	Cambic Luvisol
Állományjellemzők	mag eredetű 100% elegyarányú kocsánytalan tölgyes (utolsó használat 7 éve: növedékfokozó gyérítés)
Átlagéletkor	83 év
GPS-koordináták	N47° 53.615' E19° 05.201' ; 294 m tszf.

F2. a-h. táblázatok. A kontrollterületek adatai.

Helység	Somogytúr
Rendeltetés	mezőgazdasági terület
GPS-koordináták	N46° 40.0821' E17° 44.8665' ; 243 m tszf.

Helység, tag/részlet	Somogytúr 11/VF
Rendeltetés	vadföld
GPS-koordináták	N46° 42.329' E17° 43.474' ; 231 m tszf.

Helység	Koppányszántó
Rendeltetés	mezőgazdasági terület
GPS-koordináták	N46° 38.886' E18° 06.499' ; 199 m tszf.

Helység, tag/részlet	Balatonszemes 5/VF
Rendeltetés	vadföld
GPS-koordináták	N46° 46.6122' E17° 47.5237' ; 184 m tszf.

Helység	Vizslás
Rendeltetés	mezőgazdasági terület
GPS-koordináták	N48° 01.727' E19° 48.559' ; 220 m tszf.

Helység	Szirák
Rendeltetés	mezőgazdasági terület
GPS-koordináták	N47° 49.953' E19° 30.201' ; 237 m tszf.

Helység	Tolmács
Rendeltetés	mezőgazdasági terület
GPS-koordináták	N47° 55.331' E19° 07.013' ; 243 m tszf.

Helység	Nógrád
Rendeltetés	mezőgazdasági terület
GPS-koordináták	N47° 53.655' E19° 05.173' ; 280 m tszf.

F3. táblázat. A legfontosabb alapadatok áttekintése.

Sorsz.	Szint [cm]	Ism.	Fafaj, gen.	N <sub>össz</sub> [%]	C <sub>org</sub> [%]	C <sub>anorg</sub> [%]	pH H <sub>2</sub> O	pH KCl
001	0-5	1.	akác 1.g	0,19	1,77	0,08	7,3	6,8
002	0-5	2.	akác 1.g	0,23	2,24	0,06	7,0	6,4
003	0-5	3.	akác 1.g	0,25	2,41	0,18	7,5	7,0
004	0-5	4.	akác 1.g	0,21	2,02	0,07	7,3	6,7
005	0-5	5.	akác 1.g	0,34	3,57	0,09	7,3	6,9
006	5-10	1.	akác 1.g	0,11	0,94	0,15	7,7	7,2
007	5-10	2.	akác 1.g	0,13	1,06	0,03	6,9	6,0
008	5-10	3.	akác 1.g	0,13	1,03	0,23	7,7	7,2
009	5-10	4.	akác 1.g	0,13	1,05	0,09	7,5	7,0
010	5-10	5.	akác 1.g	0,12	1,10	0,05	7,7	7,2
011	10-30	1.	akác 1.g	0,10	0,84	0,30	7,8	7,3
012	10-30	2.	akác 1.g	0,11	0,90	0,02	7,3	6,4
013	10-30	3.	akác 1.g	0,12	1,00	0,06	7,6	7,0
014	10-30	4.	akác 1.g	0,12	0,96	0,04	7,5	6,9
015	10-30	5.	akác 1.g	0,11	0,94	0,17	7,8	7,2
016	0-5	1.	akác n.g	0,26	2,64	0,03	5,8	5,1
017	0-5	2.	akác n.g	0,26	2,79	0,02	5,7	5,0
018	0-5	3.	akác n.g	0,36	3,74	0,04	6,3	5,8
019	0-5	4.	akác n.g	0,30	3,14	0,03	5,8	5,1
020	0-5	5.	akác n.g	0,35	3,63	0,05	6,8	6,2
021	5-10	1.	akác n.g	0,17	1,60	0,02	5,4	4,6
022	5-10	2.	akác n.g	0,16	1,53	0,02	5,7	5,0
023	5-10	3.	akác n.g	0,18	1,68	0,02	5,4	4,8
024	5-10	4.	akác n.g	0,20	1,90	0,02	5,3	4,5
025	5-10	5.	akác n.g	0,26	2,50	0,03	6,8	6,2
026	10-30	1.	akác n.g	0,14	1,23	0,02	5,8	5,0
027	10-30	2.	akác n.g	0,13	1,13	0,02	6,5	5,9
028	10-30	3.	akác n.g	0,13	1,21	0,02	5,3	4,4
029	10-30	4.	akác n.g	0,12	1,05	0,02	5,6	4,7
030	10-30	5.	akác n.g	0,16	1,44	0,06	7,3	6,7
031	0-5	1.	contr	0,10	0,84	1,16	7,9	7,3
032	0-5	2.	contr	0,11	0,92	0,66	7,9	7,3
033	0-5	3.	contr	0,12	1,05	0,52	7,8	7,3
034	5-10	1.	contr	0,09	0,70	1,18	7,9	7,4
035	5-10	2.	contr	0,11	0,89	0,67	7,8	7,3
036	5-10	3.	contr	0,09	0,68	0,81	7,8	7,3
037	10-30	1.	contr	0,09	0,61	1,21	7,9	7,4
038	10-30	2.	contr	0,10	0,82	0,55	7,9	7,3
039	10-30	3.	contr	0,10	0,84	0,29	7,8	7,2

040	0-5	1.	contr	0,29	3,18	0,03	6,0	5,2
041	0-5	2.	contr	0,27	2,95	0,03	6,1	5,5
042	0-5	3.	contr	0,20	2,12	0,02	5,9	5,0
043	5-10	1.	contr	0,12	1,02	0,02	5,5	4,4
044	5-10	2.	contr	0,14	1,24	0,02	5,7	4,7
045	5-10	3.	contr	0,13	1,29	0,02	5,5	4,5
046	10-30	1.	contr	0,10	0,89	0,02	5,5	4,3
047	10-30	2.	contr	0,10	0,83	0,02	5,5	4,2
048	10-30	3.	contr	0,09	0,79	0,02	5,5	4,2
097	0-5	1.	tölgy 1.g	0,29	2,77	0,03	7,1	6,5
098	0-5	2.	tölgy 1.g	0,28	2,67	0,03	7,1	6,5
099	0-5	3.	tölgy 1.g	0,27	2,70	0,06	7,4	6,8
100	0-5	4.	tölgy 1.g	0,31	3,03	0,07	7,4	7,0
101	0-5	5.	tölgy 1.g	0,29	2,80	0,04	7,3	6,7
102	5-10	1.	tölgy 1.g	0,22	2,03	0,03	7,4	6,8
103	5-10	2.	tölgy 1.g	0,23	2,05	0,03	7,3	6,8
104	5-10	3.	tölgy 1.g	0,23	2,07	0,06	7,6	7,1
105	5-10	4.	tölgy 1.g	0,24	2,13	0,05	7,5	7,0
106	5-10	5.	tölgy 1.g	0,23	2,13	0,03	7,4	6,8
107	10-30	1.	tölgy 1.g	0,22	1,93	0,06	7,6	7,1
108	10-30	2.	tölgy 1.g	0,22	1,95	0,03	7,4	6,8
109	10-30	3.	tölgy 1.g	0,21	1,92	0,09	7,7	7,2
110	10-30	4.	tölgy 1.g	0,22	1,99	0,06	7,6	7,1
111	10-30	5.	tölgy 1.g	0,22	1,95	0,05	7,6	7,1
112	0-5	1.	contr	0,21	1,88	0,22	7,8	7,3
113	0-5	2.	contr	0,21	1,82	0,28	7,8	7,4
114	0-5	3.	contr	0,22	1,75	0,37	7,9	7,4
115	5-10	1.	contr	0,21	1,94	0,28	7,9	7,4
116	5-10	2.	contr	0,22	1,86	0,32	7,9	7,4
117	5-10	3.	contr	0,21	1,84	0,32	7,9	7,4
118	10-30	1.	contr	0,22	2,02	0,30	7,9	7,3
119	10-30	2.	contr	0,22	1,85	0,32	7,9	7,4
120	10-30	3.	contr	0,22	2,02	0,35	7,9	7,3
121	0-5	1.	tölgy n.g	0,29	3,25	0,02	5,1	4,1
122	0-5	2.	tölgy n.g	0,46	5,99	0,05	6,5	5,9
123	0-5	3.	tölgy n.g	0,47	6,06	0,07	6,8	6,3
124	0-5	4.	tölgy n.g	0,36	4,11	0,03	5,0	4,2
125	0-5	5.	tölgy n.g	0,41	4,80	0,04	6,5	6,0
126	5-10	1.	tölgy n.g	0,20	2,01	0,02	4,9	3,7
127	5-10	2.	tölgy n.g	0,32	3,72	0,02	5,4	4,5
128	5-10	3.	tölgy n.g	0,27	2,87	0,02	5,4	4,3
129	5-10	4.	tölgy n.g	0,19	1,81	0,02	4,9	3,7
130	5-10	5.	tölgy n.g	0,24	2,45	0,02	5,4	4,5
131	10-30	1.	tölgy n.g	0,17	1,62	0,02	5,5	4,6
132	10-30	2.	tölgy n.g	0,19	1,81	0,02	4,8	3,6
133	10-30	3.	tölgy n.g	0,20	1,90	0,02	5,1	3,8
134	10-30	4.	tölgy n.g	0,16	1,51	0,02	5,6	4,6
135	10-30	5.	tölgy n.g	0,18	1,65	0,02	6,1	5,1
136	0-5	1.	contr	0,39	3,48	0,69	7,6	7,1
137	0-5	2.	contr	0,20	2,04	0,71	7,6	7,1
138	0-5	3.	contr	0,32	2,83	1,02	7,7	7,1
139	5-10	1.	contr	0,32	2,99	0,83	7,6	7,1
140	5-10	2.	contr	0,28	2,46	0,75	7,7	7,2
141	5-10	3.	contr	0,24	2,04	1,05	7,7	7,2
142	10-30	1.	contr	0,25	2,14	0,69	7,8	7,2
143	10-30	2.	contr	0,19	1,65	0,70	7,9	7,2
144	10-30	3.	contr	0,23	2,06	1,01	7,8	7,2
145	0-5	1.	akác 1.g	0,44	4,78	0,06	5,8	5,3

146	0-5	2.	akác 1.g	0,46	5,53	0,08	5,6	5,2
147	0-5	3.	akác 1.g	0,22	2,26	0,02	5,3	4,6
148	0-5	4.	akác 1.g	0,30	3,05	0,02	5,2	4,6
149	0-5	5.	akác 1.g	0,46	5,26	0,04	5,6	5,2
150	5-10	1.	akác 1.g	0,18	1,71	0,02	5,4	4,8
151	5-10	2.	akác 1.g	0,21	2,11	0,02	5,4	4,8
152	5-10	3.	akác 1.g	0,16	1,54	0,03	5,6	4,9
153	5-10	4.	akác 1.g	0,17	1,66	0,03	5,9	5,4
154	5-10	5.	akác 1.g	0,26	2,71	0,03	6,5	6,3
155	10-30	1.	akác 1.g	0,15	1,50	0,02	5,9	5,1
156	10-30	2.	akác 1.g	0,13	1,24	0,02	5,4	4,5
157	10-30	3.	akác 1.g	0,14	1,40	0,02	6,3	5,4
158	10-30	4.	akác 1.g	0,13	1,27	0,02	5,7	4,8
159	10-30	5.	akác 1.g	0,16	1,41	0,07	6,6	5,8
160	0-5	1.	contr	0,26	2,52	0,03	5,8	5,2
161	0-5	2.	contr	0,26	2,58	0,02	5,7	5,1
162	0-5	3.	contr	0,24	2,56	0,02	6,0	5,4
163	5-10	1.	contr	0,21	1,84	0,02	5,7	5,0
164	5-10	2.	contr	0,24	2,35	0,02	5,5	4,9
165	5-10	3.	contr	0,19	1,78	0,02	6,0	5,5
166	10-30	1.	contr	0,14	1,18	0,03	5,7	4,9
167	10-30	2.	contr	0,14	1,13	0,02	5,9	5,2
168	10-30	3.	contr	0,15	1,16	0,02	5,7	4,9
169	0-5	1.	akác n.g	0,51	5,91	0,07	6,5	6,0
170	0-5	2.	akác n.g	0,48	5,41	0,04	6,2	5,5
171	0-5	3.	akác n.g	0,48	5,24	0,05	6,0	5,4
172	0-5	4.	akác n.g	0,50	5,30	0,05	6,2	5,6
173	0-5	5.	akác n.g	0,45	4,66	0,09	6,5	6,0
174	5-10	1.	akác n.g	0,49	5,14	0,08	6,4	5,8
175	5-10	2.	akác n.g	0,24	2,48	0,03	5,2	4,4
176	5-10	3.	akác n.g	0,32	3,31	0,03	5,8	5,1
177	5-10	4.	akác n.g	0,29	2,92	0,02	5,3	4,5
178	5-10	5.	akác n.g	0,21	2,00	0,02	5,6	4,7
179	10-30	1.	akác n.g	0,24	2,43	0,02	5,6	4,8
180	10-30	2.	akác n.g	0,19	1,96	0,02	5,2	4,4
181	10-30	3.	akác n.g	0,20	1,92	0,02	5,9	4,9
182	10-30	4.	akác n.g	0,20	1,99	0,02	5,8	4,9
183	10-30	5.	akác n.g	0,28	2,68	0,03	6,0	5,1
184	0-5	1.	contr	0,13	1,16	0,02	6,2	5,0
185	0-5	2.	contr	0,16	1,42	0,03	6,3	5,1
186	0-5	3.	contr	0,17	1,56	0,02	6,3	5,3
187	5-10	1.	contr	0,16	1,45	0,02	6,2	5,0
188	5-10	2.	contr	0,17	1,41	0,01	6,1	5,0
189	5-10	3.	contr	0,17	1,45	0,02	6,2	5,0
190	10-30	1.	contr	0,15	1,31	0,02	6,1	4,9
191	10-30	2.	contr	0,14	1,15	0,02	6,1	4,8
192	10-30	3.	contr	0,17	1,45	0,04	6,2	4,9
193	0-5	1.	tölgy 1.g	0,21	2,34	0,02	5,6	4,7
194	0-5	2.	tölgy 1.g	0,18	1,89	0,02	5,3	4,4
195	0-5	3.	tölgy 1.g	0,20	2,18	0,02	5,4	4,6
196	0-5	4.	tölgy 1.g	0,19	1,87	0,02	5,6	4,8
197	0-5	5.	tölgy 1.g	0,18	1,75	0,03	6,0	5,0
198	5-10	1.	tölgy 1.g	0,15	1,35	0,03	5,0	4,0
199	5-10	2.	tölgy 1.g	0,11	0,91	0,03	5,1	4,0
200	5-10	3.	tölgy 1.g	0,16	1,45	0,02	5,2	4,1
201	5-10	4.	tölgy 1.g	0,13	1,12	0,02	5,5	4,5
202	5-10	5.	tölgy 1.g	0,13	1,21	0,02	5,6	4,6
203	10-30	1.	tölgy 1.g	0,10	0,85	0,02	5,5	4,4

204	10-30	2.	tölgy 1.g	0,12	0,97	0,02	5,4	4,3
205	10-30	3.	tölgy 1.g	0,12	1,06	0,03	5,4	4,4
206	10-30	4.	tölgy 1.g	0,11	0,88	0,03	5,8	4,6
207	10-30	5.	tölgy 1.g	0,12	0,87	0,02	6,1	4,9
208	0-5	1.	contr	0,14	1,55	0,02	5,9	4,8
209	0-5	2.	contr	0,11	0,97	0,02	5,9	4,8
210	0-5	3.	contr	0,12	1,02	0,02	5,9	4,9
211	5-10	1.	contr	0,11	1,04	0,02	5,9	4,7
212	5-10	2.	contr	0,10	0,89	0,02	5,8	4,6
213	5-10	3.	contr	0,10	0,86	0,02	5,7	4,6
214	10-30	1.	contr	0,11	0,99	0,02	5,8	4,7
215	10-30	2.	contr	0,12	1,00	0,02	5,6	4,6
216	10-30	3.	contr	0,12	0,98	0,02	6,0	4,6
217	0-5	1.	tölgy n.g	0,23	2,94	0,04	5,3	4,2
218	0-5	2.	tölgy n.g	0,19	2,59	0,05	6,4	5,6
219	0-5	3.	tölgy n.g	0,23	3,01	0,02	5,9	5,1
220	0-5	4.	tölgy n.g	0,29	3,75	0,03	6,3	5,5
221	0-5	5.	tölgy n.g	0,35	4,57	0,05	6,3	5,6
222	5-10	1.	tölgy n.g	0,07	0,75	0,02	4,8	3,5
223	5-10	2.	tölgy n.g	0,05	0,59	0,02	4,7	3,4
224	5-10	3.	tölgy n.g	0,10	1,14	0,03	4,7	3,5
225	5-10	4.	tölgy n.g	0,19	2,55	0,03	5,7	4,9
226	5-10	5.	tölgy n.g	0,10	1,17	0,02	4,7	3,5
227	10-30	1.	tölgy n.g	0,08	0,79	0,02	5,3	3,8
228	10-30	2.	tölgy n.g	0,07	0,74	0,02	6,0	4,8
229	10-30	3.	tölgy n.g	0,07	0,71	0,02	4,9	3,5
230	10-30	4.	tölgy n.g	0,10	1,07	0,02	5,4	4,0
231	10-30	5.	tölgy n.g	0,08	0,84	0,03	5,1	3,6
232	0-5	1.	contr	0,16	1,42	0,03	6,2	4,9
233	0-5	2.	contr	0,13	1,27	0,02	6,1	4,8
234	0-5	3.	contr	0,15	1,38	0,02	6,2	4,8
235	5-10	1.	contr	0,13	1,24	0,02	6,1	4,6
236	5-10	2.	contr	0,13	1,20	0,02	6,1	4,7
237	5-10	3.	contr	0,14	1,25	0,02	6,0	4,5
238	10-30	1.	contr	0,13	1,21	0,03	6,0	4,7
239	10-30	2.	contr	0,13	1,21	0,03	6,2	4,7
240	10-30	3.	contr	0,13	1,22	0,02	6,2	4,7

F4. a. táblázat. A Kruskal–Wallis-próbák áttekintő táblázata.

Tesztelt változó	Régió	p-érték	$\eta^2$ [H]	Értelmezés
Corg	N	7,27E-07	0,389	erős
Corg	S	7,85E-07	0,387	erős
m Avar	N	6,95E-04	0,153	erős
m Avar	S	4,64E-02	0,054	gyenge
térfogattömeg	N	7,99E-04	0,203	erős
térfogattömeg	S	6,97E-04	0,153	erős
N össz	N	4,13E-08	0,462	erős
N össz	S	3,32E-07	0,409	erős
C org	N	5,97E-07	0,394	erős
C org	S	7,83E-06	0,328	erős
Canorg	N	8,73E-03	0,134	közepes
Canorg	S	2,71E-14	0,813	erős
pH H2O	N	3,93E-05	0,285	erős
pH H2O	S	3,49E-15	0,863	erős
pH KCl	N	2,55E-05	0,296	erős

pH KCl	S	1,93E-15	0,877	erős
agyag százalék	N	1,92E-16	0,933	erős
agyag százalék	S	1,20E-16	0,944	erős
Corg	N	4,25E-07	0,294	erős
Corg	S	1,77E-07	0,313	erős
Corg	N+S	3,30E-13	0,294	erős
C/N arány	N	5,10E-09	0,515	erős
C/N arány	S	8,13E-09	0,503	erős
C/N fLF	N	5,09E-09	0,515	erős
C/N fLF	S	4,14E-05	0,284	erős
C/N oLF	N	2,44E-09	0,533	erős
C/N oLF	S	3,35E-09	0,525	erős
C/N HF	N	4,44E-05	0,282	erős
C/N HF	S	8,92E-04	0,200	erős

F4. b. A Dunn-féle páros tesztek összefoglaló táblázata.

Tesztelt változó	Régió	1. csoport	2. csoport	n1	n2	rank sum	p-ért.	Mód. p-ért.	Szignif.
Corg	N	akác n.g	akác n.g contr	15	9	-3,14E+00	1,69E-03	4,72E-02	*
Corg	N	akác n.g	tölgy 1.g	15	15	-4,37E+00	1,23E-05	3,45E-04	***
Corg	N	akác n.g	tölgy n.g	15	15	-4,03E+00	5,56E-05	1,56E-03	**
Corg	S	akác 1.g	tölgy n.g	15	15	3,28E+00	1,03E-03	2,87E-02	*
m Avar	N	akác 1.g	akác n.g	5	5	2,73E+00	6,41E-03	3,85E-02	*
m Avar	N	akác 1.g	tölgy n.g	5	5	3,90E+00	9,54E-05	5,72E-04	***
m Avar	S								ns
térfigattömög	N	akác n.g	tölgy 1.g	9	9	4,07E+00	4,62E-05	1,29E-03	**
térfigattömög	N	akác n.g	tölgy n.g	9	9	3,40E+00	6,72E-04	1,88E-02	*
térfigattömög	S	akác 1.g	akác n.g	9	9	-3,69E+00	2,23E-04	1,34E-03	**
térfigattömög	S	akác 1.g	tölgy 1.g	9	9	-2,84E+00	4,49E-03	2,70E-02	*
térfigattömög	S	akác 1.g	tölgy n.g	9	9	-3,36E+00	7,91E-04	4,75E-03	**
N össz	N	akác n.g	tölgy 1.g	15	15	-4,23E+00	2,33E-05	6,52E-04	***
N össz	N	akác n.g	tölgy n.g	15	15	-4,81E+00	1,53E-06	4,27E-05	****
N össz	S	akác 1.g	tölgy 1.g	15	15	3,33E+00	8,70E-04	2,44E-02	*
C össz	N	akác 1.g	tölgy 1.g contr	15	9	-3,86E+00	1,13E-04	3,15E-03	**
C össz	N	akác n.g	akác n.g contr	15	9	-3,18E+00	1,46E-03	4,08E-02	*
C össz	N	akác n.g	tölgy 1.g	15	15	-4,36E+00	1,27E-05	3,56E-04	***
C össz	N	akác n.g	tölgy n.g	15	15	-4,02E+00	5,72E-05	1,60E-03	**
C össz	S	akác 1.g	tölgy n.g	15	15	3,45E+00	5,66E-04	1,58E-02	*
Canorg	N								ns
Canorg	S	akác 1.g	tölgy n.g	15	15	-3,40E+00	6,83E-04	1,91E-02	*
Canorg	S	akác 1.g contr	akác n.g contr	9	9	-5,27E+00	1,34E-07	3,75E-06	****
Canorg	S	akác n.g contr	tölgy n.g contr	9	9	5,48E+00	4,34E-08	1,22E-06	****
Canorg	S	tölgy n.g	tölgy n.g contr	15	9	5,68E+00	1,33E-08	3,73E-07	****
pH H2O	N	tölgy n.g	tölgy n.g contr	15	9	3,54E+00	4,07E-04	1,14E-02	*
pH H2O	S	akác 1.g	akác n.g	15	15	-3,24E+00	1,18E-03	3,29E-02	*
pH H2O	S	akác 1.g	tölgy n.g	15	15	-4,17E+00	3,01E-05	8,44E-04	***
pH H2O	S	akác 1.g contr	akác n.g contr	9	9	-4,73E+00	2,19E-06	6,14E-05	****
pH H2O	S	akác n.g contr	tölgy 1.g contr	9	9	5,17E+00	2,33E-07	6,53E-06	****
pH H2O	S	akác n.g contr	tölgy n.g contr	9	9	3,80E+00	1,47E-04	4,13E-03	**
pH H2O	S	tölgy 1.g	tölgy n.g	15	15	-3,85E+00	1,19E-04	3,34E-03	**
pH H2O	S	tölgy n.g	tölgy n.g contr	15	9	4,78E+00	1,78E-06	4,98E-05	****
pH KCl	N	akác 1.g	tölgy 1.g	15	15	-3,63E+00	2,86E-04	8,00E-03	**
pH KCl	N	akác n.g	tölgy 1.g	15	15	-3,56E+00	3,72E-04	1,04E-02	*
pH KCl	S	akác 1.g	tölgy n.g	15	15	-4,07E+00	4,69E-05	1,31E-03	**
pH KCl	S	akác 1.g contr	akác n.g contr	9	9	-5,06E+00	4,28E-07	1,20E-05	****
pH KCl	S	akác n.g contr	tölgy 1.g contr	9	9	5,64E+00	1,74E-08	4,88E-07	****

pH KCl	S	akác n.g contr	tölgy n.g contr	9	9	4,03E+00	5,62E-05	1,57E-03	**
pH KCl	S	tölgy 1.g	tölgy 1.g contr	15	9	3,15E+00	1,61E-03	4,50E-02	*
pH KCl	S	tölgy 1.g	tölgy n.g	15	15	-3,78E+00	1,55E-04	4,35E-03	**
pH KCl	S	tölgy n.g	tölgy n.g contr	15	9	4,63E+00	3,62E-06	1,01E-04	***
agyag százalék	N	akác 1.g	tölgy 1.g	15	15	-3,57E+00	3,60E-04	1,01E-02	*
agyag százalék	N	akác 1.g	tölgy n.g	15	15	-5,60E+00	2,13E-08	5,97E-07	****
agyag százalék	N	akác 1.g contr	tölgy 1.g contr	9	9	-4,27E+00	1,98E-05	5,54E-04	***
agyag százalék	N	akác n.g	tölgy 1.g	15	15	-5,53E+00	3,23E-08	9,04E-07	****
agyag százalék	N	akác n.g	tölgy n.g	15	15	-7,56E+00	3,98E-14	1,11E-12	****
agyag százalék	S	akác 1.g	tölgy n.g	15	15	4,39E+00	1,15E-05	3,21E-04	***
agyag százalék	S	akác n.g	tölgy 1.g	15	15	5,23E+00	1,72E-07	4,82E-06	****
agyag százalék	S	akác n.g	tölgy n.g	15	15	7,02E+00	2,26E-12	6,33E-11	****
agyag százalék	S	akác n.g contr	tölgy n.g contr	9	9	3,43E+00	6,06E-04	1,70E-02	*
agyag százalék	S	tölgy n.g	tölgy n.g contr	15	9	-3,32E+00	8,92E-04	2,50E-02	*
Corg	N	0-5 cm	10-30 cm	32	32	-5,38E+00	7,44E-08	2,23E-07	****
Corg	N	0-5 cm	5-10 cm	32	32	-3,24E+00	1,22E-03	3,65E-03	**
Corg	N	10-30 cm	5-10 cm	32	32	2,14E+00	3,20E-02	9,59E-02	ns
Corg	S	0-5 cm	10-30 cm	32	32	-5,49E+00	4,07E-08	1,22E-07	****
Corg	S	0-5 cm	5-10 cm	32	32	-3,60E+00	3,20E-04	9,59E-04	***
Corg	S	10-30 cm	5-10 cm	32	32	1,89E+00	5,89E-02	1,77E-01	ns
Corg	N+S	0-5 cm	10-30 cm	64	64	-7,48E+00	7,58E-14	2,28E-13	****
Corg	N+S	0-5 cm	5-10 cm	64	64	-4,82E+00	1,41E-06	4,22E-06	****
Corg	N+S	10-30 cm	5-10 cm	64	64	2,65E+00	7,98E-03	2,39E-02	*
C/N arány	N	akác n.g	akác n.g contr	15	9	-3,91E+00	9,35E-05	2,62E-03	**
C/N arány	N	akác n.g	tölgy 1.g	15	15	-3,38E+00	7,37E-04	2,06E-02	*
C/N arány	N	tölgy 1.g	tölgy n.g	15	15	4,91E+00	9,16E-07	2,56E-05	****
C/N arány	N	tölgy 1.g contr	tölgy n.g	9	15	4,37E+00	1,22E-05	3,41E-04	***
C/N arány	N	tölgy n.g	tölgy n.g contr	15	9	-3,84E+00	1,26E-04	3,52E-03	**
C/N arány	S	akác 1.g	tölgy n.g	15	15	4,44E+00	8,85E-06	2,48E-04	***
C/N arány	S	akác 1.g contr	akác n contr	9	9	3,60E+00	3,23E-04	9,05E-03	**
C/N arány	S	tölgy n.g	tölgy n.g contr	15	9	-3,47E+00	5,17E-04	1,45E-02	*
C/N fLF	N	akác 1.g	akác 1.g contr	10	6	3,50E+00	4,63E-04	1,30E-02	*
C/N fLF	N	akác 1.g	tölgy 1.g	10	10	5,19E+00	2,12E-07	5,95E-06	****
C/N fLF	N	akác 1.g	tölgy n.g	10	10	4,73E+00	2,23E-06	6,23E-05	****
C/N fLF	N	akác n.g	tölgy 1.g	10	10	4,88E+00	1,08E-06	3,03E-05	****
C/N fLF	N	akác n.g	tölgy n.g	10	10	4,42E+00	9,89E-06	2,77E-04	***
C/N fLF	N	tölgy n.g	tölgy n.g contr	10	6	-3,14E+00	1,66E-03	4,66E-02	*
C/N fLF	S	akác 1.g	tölgy 1.g	10	10	3,22E+00	1,29E-03	3,61E-02	*
C/N fLF	S	akác 1.g	tölgy n.g	10	10	4,02E+00	5,74E-05	1,61E-03	**
C/N oLF	N	akác 1.g	tölgy n.g	10	10	3,35E+00	8,06E-04	2,26E-02	*
C/N oLF	N	tölgy 1.g	tölgy 1.g contr	10	6	-4,16E+00	3,23E-05	9,04E-04	***
C/N oLF	N	tölgy n.g	tölgy n.g contr	10	6	-5,61E+00	2,03E-08	5,68E-07	****
C/N oLF	S	akác 1.g	tölgy n.g	10	10	3,76E+00	1,71E-04	4,78E-03	**
C/N oLF	S	akác 1.g contr	akác n.g contr	6	6	3,27E+00	1,07E-03	3,00E-02	*
C/N oLF	S	tölgy 1.g	tölgy n.g	10	10	4,28E+00	1,91E-05	5,34E-04	***
C/N oLF	S	tölgy n.g	tölgy n.g contr	10	6	-4,44E+00	9,10E-06	2,55E-04	***
C/N HF	N								ns
C/N HF	S	tölgy n.g	tölgy n.g contr	10	6	3,46E+00	5,47E-04	1,53E-02	*

F5. táblázat. A SOM-frakcionálás legfontosabb nyers adatainak áttekintése.

Sorsz.	m <sub>FLF</sub> [g]	m <sub>OLF</sub> [g]	m <sub>HF</sub> [g]	N <sub>FLF</sub> [%]	C <sub>FLF</sub> [%]	N <sub>OLF</sub> [%]	C <sub>OLF</sub> [%]	N <sub>HF</sub> [%]	C <sub>HF</sub> [%]
001	0,114	0,255	21,262	2,018	24,926	3,345	42,363	0,165	1,048
002	0,262	0,365	20,830	1,557	19,758	3,837	45,248	0,192	1,302
003	0,178	0,509	21,122	2,015	26,889	3,660	44,814	0,200	1,540
004	0,316	0,261	20,989	1,606	21,700	3,146	42,062	0,182	1,308



005	0,903	0,572	19,874	1,831	23,093	3,732	43,967	0,230	1,914
006	0,014	0,071	21,779	2,518	30,506	3,050	43,986	0,127	0,734
007	0,077	0,069	21,276	1,046	13,933	3,070	44,231	0,196	0,636
008	0,014	0,166	21,687	2,070	29,008	1,995	28,991	0,240	0,861
009	0,028	0,109	21,148	1,477	20,893	2,460	35,820	0,134	0,732
010	0,027	0,143	21,583	2,371	30,308	1,967	29,076	0,130	0,715
016	0,843	0,477	21,439	0,762	8,693	2,639	41,589	0,200	1,418
017	0,406	0,477	22,495	1,084	20,000	2,851	45,241	0,227	1,698
018	0,260	0,921	21,898	1,671	22,315	3,299	44,583	0,269	2,106
019	0,498	0,523	22,311	0,999	13,584	3,103	45,536	0,247	1,849
020	0,146	0,597	21,545	1,504	25,992	2,975	44,112	0,262	2,021
021	0,161	0,184	22,848	0,788	8,642	2,434	42,259	0,170	1,104
022	0,110	0,170	23,062	0,978	12,819	2,578	44,382	0,162	1,005
023	0,050	0,240	22,357	1,626	22,178	2,890	44,593	0,161	1,029
024	0,105	0,236	22,815	0,905	11,649	2,802	44,452	0,182	1,264
025	0,071	0,373	22,313	1,442	25,639	2,731	43,947	0,227	1,516
031	0,042	0,087	22,471	2,201	31,503	3,321	38,979	0,121	1,557
032	0,036	0,093	22,176	2,222	27,918	3,351	38,446	0,124	1,115
033	0,046	0,122	22,005	1,937	23,653	3,430	38,973	0,155	1,034
034	0,059	0,049	22,030	1,458	19,866	3,765	44,273	0,109	1,522
035	0,057	0,076	21,920	2,257	27,521	3,898	44,763	0,126	1,083
036	0,034	0,054	21,943	1,804	23,776	3,430	44,330	0,168	1,134
040	1,274	0,166	21,574	0,924	12,778	2,864	42,145	0,243	2,196
041	3,687	0,108	19,631	0,681	8,032	2,827	43,678	0,210	1,913
042	1,427	0,040	22,100	0,698	8,721	2,414	46,365	0,171	1,446
043	1,024	0,042	22,511	0,253	1,972	2,450	44,629	0,129	0,734
044	0,082	0,058	23,692	1,477	22,702	2,981	45,328	0,147	0,920
045	0,417	0,034	23,033	0,707	8,653	2,315	42,479	0,137	0,855
097	0,140	0,215	21,953	1,323	21,184	3,277	42,035	0,266	2,137
098	0,054	0,220	21,836	1,949	32,136	3,324	42,712	0,268	2,054
099	0,109	0,208	21,370	1,630	30,827	3,271	41,643	0,265	2,164
100	0,212	0,250	21,059	1,857	30,624	3,107	41,750	0,274	2,245
101	0,127	0,254	21,581	1,856	33,309	3,611	41,852	0,278	2,115
102	0,015	0,113	21,397	1,317	19,471	3,456	44,401	0,230	1,679
103	0,017	0,095	21,396	1,767	26,334	3,466	44,962	0,241	1,714
104	0,013	0,107	21,571	1,091	21,853	3,140	42,482	0,242	1,755
105	0,022	0,115	21,544	1,646	28,740	3,503	44,580	0,243	1,774
106	0,009	0,121	21,521	1,514	24,853	3,425	43,488	0,227	1,694
112	0,024	0,116	21,987	1,543	21,949	4,261	45,958	0,214	1,670
113	0,028	0,100	22,225	1,890	23,249	4,314	45,521	0,221	1,739
114	0,019	0,102	22,073	1,384	24,999	4,281	45,601	0,220	1,767
115	0,034	0,111	21,856	1,465	24,059	4,270	46,232	0,225	1,728
116	0,011	0,115	21,985	1,242	15,329	3,325	44,159	0,224	1,780
117	0,027	0,103	21,717	1,036	16,726	3,718	42,511	0,216	1,724
121	0,604	0,258	21,653	1,034	18,335	2,025	42,876	0,487	2,234
122	1,048	1,019	20,448	1,319	26,260	2,147	42,892	0,648	3,689
123	0,501	0,863	19,820	1,416	31,745	2,029	42,551	0,856	3,875
124	0,921	0,404	21,294	0,997	13,706	2,018	41,980	0,319	2,816
125	0,791	0,579	20,853	1,200	19,459	2,194	42,216	0,327	3,121
126	0,148	0,452	21,674	0,970	16,722	2,127	42,885	0,202	1,407
127	0,262	0,102	21,541	1,186	20,995	1,937	47,836	0,284	2,424
128	0,334	0,229	21,381	1,013	20,322	2,039	44,160	0,404	1,923
129	0,114	0,103	21,367	1,008	22,944	1,922	45,818	0,182	1,256
130	0,093	0,176	19,519	1,207	32,011	2,013	45,250	0,252	1,364
136	0,476	0,503	20,571	1,933	25,775	3,788	43,156	0,321	3,104
137	0,659	0,384	20,615	1,101	14,740	4,192	42,621	0,317	2,585
138	0,058	0,170	21,147	1,097	21,580	3,288	43,691	0,209	2,279
139	0,251	0,351	20,253	1,165	19,298	3,283	40,851	0,269	2,763

140	0,080	0,248	20,421	1,521	25,673	3,408	42,996	0,261	2,303
141	0,173	0,170	21,092	0,718	9,439	3,249	43,112	0,209	2,265
145	0,881	0,658	19,300	1,602	21,919	3,361	45,955	0,274	2,481
146	1,849	1,445	17,505	1,708	25,864	3,010	45,376	0,348	3,563
147	0,275	0,180	19,937	1,768	22,070	3,010	47,522	0,191	1,565
148	0,494	0,393	19,008	1,543	20,873	3,288	45,895	0,239	2,117
149	0,833	0,961	19,253	1,829	25,430	3,028	45,027	0,312	2,995
150	0,040	0,146	20,149	2,386	32,821	2,623	47,033	0,163	1,271
151	0,108	0,398	19,969	2,231	30,624	2,649	45,949	0,207	1,708
152	0,071	0,123	20,074	2,120	30,267	2,508	47,522	0,161	1,195
153	0,078	0,145	18,400	1,835	27,494	2,605	45,648	0,149	1,194
154	0,146	0,327	19,096	2,226	28,755	2,767	46,335	0,181	1,538
160	0,321	0,179	18,266	1,374	28,406	2,757	44,575	0,164	1,391
161	0,280	0,275	18,640	1,435	29,212	2,784	43,775	0,182	1,567
162	0,397	0,250	19,178	1,360	27,239	2,651	42,004	0,199	1,745
163	0,216	0,154	18,932	1,468	29,943	2,770	41,746	0,175	1,389
164	0,234	0,210	19,143	1,561	27,217	2,909	43,560	0,199	1,640
165	0,111	0,115	18,986	1,541	31,741	2,882	42,467	0,172	1,325
169	0,378	1,319	19,879	1,878	27,672	2,902	44,128	0,402	3,768
170	0,412	0,819	20,011	1,671	27,863	2,708	44,029	0,315	2,788
171	0,818	1,157	21,262	2,135	29,047	2,985	46,734	0,403	3,692
172	0,303	1,127	21,811	1,848	27,612	2,919	46,538	0,422	3,772
173	0,298	1,114	19,558	2,044	30,180	3,213	45,888	0,367	3,251
174	0,244	0,887	18,860	1,779	27,467	2,765	44,723	0,344	3,264
175	0,176	0,269	20,014	1,426	19,338	2,357	43,649	0,215	1,814
176	0,386	0,659	18,551	1,669	23,005	2,705	44,634	0,328	3,009
177	0,455	0,276	19,070	1,252	15,954	2,216	43,123	0,271	2,377
178	0,306	0,212	19,798	1,915	24,911	2,804	45,180	0,229	1,871
184	0,132	0,116	20,431	1,290	19,831	3,242	45,664	0,160	1,108
185	0,174	0,110	20,283	1,194	19,072	3,018	45,013	0,150	1,043
186	0,193	0,109	20,282	1,202	19,524	2,991	45,055	0,152	1,069
187	0,238	0,117	20,145	1,261	22,351	2,957	43,323	0,161	1,154
188	0,167	0,090	19,788	1,310	22,909	3,007	44,020	0,145	1,021
189	0,139	0,095	20,022	1,371	26,215	2,871	43,631	0,157	1,130
193	0,264	0,219	22,005	1,224	24,391	2,300	44,554	0,156	1,455
194	0,579	0,241	21,701	1,139	23,227	2,167	44,576	0,153	1,360
195	0,462	0,300	21,901	1,295	26,694	2,237	44,695	0,161	1,414
196	0,310	0,198	21,829	1,338	28,456	2,381	44,960	0,148	1,284
197	0,256	0,218	22,241	1,222	26,539	2,286	44,117	0,155	1,453
198	0,204	0,123	22,096	0,885	19,722	2,178	42,606	0,123	0,877
199	0,121	0,096	21,823	1,281	33,550	1,837	39,905	0,107	0,665
200	0,267	0,150	22,081	1,076	25,959	2,211	43,128	0,131	0,974
201	0,099	0,098	22,782	1,416	35,980	2,298	42,482	0,135	0,941
202	0,097	0,101	22,329	1,490	33,429	2,302	42,068	0,131	0,924
208	0,270	0,083	22,122	1,185	21,209	2,995	40,463	0,107	0,684
209	0,217	0,087	22,157	1,304	25,920	2,804	37,698	0,104	0,617
210	0,154	0,062	22,279	1,323	23,655	3,524	43,742	0,106	0,639
211	0,067	0,087	21,996	1,552	28,501	3,219	41,693	0,109	0,698
212	0,104	0,065	22,016	1,378	25,109	2,644	37,968	0,107	0,646
213	0,050	0,065	22,114	1,296	25,508	2,724	38,284	0,103	0,534
217	2,106	0,448	20,694	1,127	20,972	2,053	44,575	0,190	2,020
218	0,678	0,511	21,809	2,127	44,655	1,205	25,663	0,172	1,727
219	1,250	0,422	21,391	1,955	44,641	2,321	44,187	0,181	1,744
220	1,345	1,033	20,520	1,316	26,396	2,064	41,935	0,216	2,315
221	1,775	1,193	20,195	1,281	22,256	2,077	41,522	0,287	3,292
222	0,142	0,092	22,714	1,082	26,375	1,558	44,961	0,086	0,503
223	0,105	0,073	22,700	1,203	34,300	1,307	44,161	0,072	0,341
224	0,261	0,125	23,045	0,707	16,337	1,738	45,107	0,101	0,811

225	0,349	0,367	22,902	1,074	26,702	1,973	45,181	0,191	1,842
226	0,709	0,152	22,345	0,636	12,452	1,946	45,608	0,138	1,159
232	0,657	0,296	21,426	2,429	31,382	4,009	43,697	0,160	1,251
233	0,691	0,240	21,001	2,036	30,242	3,339	43,390	0,141	0,985
234	0,234	0,200	21,434	2,075	29,288	3,394	43,258	0,140	1,005
235	0,176	0,155	21,250	1,377	23,603	3,397	42,676	0,126	0,818
236	0,131	0,155	21,463	1,691	28,001	3,546	43,276	0,134	0,936
237	0,195	0,147	21,701	1,486	26,062	3,992	43,014	0,140	0,967

F6. táblázat. Szerves szén koncentrációk összesített adatai (medián-, átlag- és szórás adatokkal) az egyes SOM-frakcióiban, valamennyi mintavételi helyre, a 0–10 cm-es szintben.

Mintavételi hely besorolása		„Nógrád”			„Somogy”		
		c C <sub>ILF</sub>	c C <sub>OLF</sub>	c C <sub>HF</sub>	c C <sub>ILF</sub>	c C <sub>OLF</sub>	c C <sub>HF</sub>
		[g kg <sup>-1</sup> ]	[g kg <sup>-1</sup> ]	[g kg <sup>-1</sup> ]	[g kg <sup>-1</sup> ]	[g kg <sup>-1</sup> ]	[g kg <sup>-1</sup> ]
akác 1. gen	$\tilde{x}$	266,79	459,52	16,37	240,10	431,65	9,55
	$\bar{x}$	266,12	462,26	19,63	241,01	400,56	10,79
	$\sigma$	38,85	8,23	7,73	50,14	60,67	4,04
akác 1. gen contr	$\tilde{x}$	288,09	430,14	14,79	256,49	416,26	11,25
	$\bar{x}$	289,60	430,21	15,10	257,06	416,27	12,41
	$\sigma$	15,85	10,20	1,52	37,38	28,38	2,14
akác n. gen	$\tilde{x}$	275,40	446,79	31,30	167,92	444,17	14,67
	$\bar{x}$	253,05	448,63	29,61	171,51	440,69	15,01
	$\sigma$	43,41	11,52	7,00	64,50	11,73	3,85
akác n. gen contr	$\tilde{x}$	210,91	445,17	10,89	86,87	441,54	11,83
	$\bar{x}$	216,50	444,51	10,88	104,76	441,04	13,44
	$\sigma$	24,96	8,45	0,47	63,18	15,03	5,55
tölgy 1. gen	$\tilde{x}$	266,17	436,23	11,29	275,37	425,97	19,14
	$\bar{x}$	277,95	433,09	11,35	269,33	429,91	19,33
	$\sigma$	48,59	15,10	2,74	46,80	12,06	2,16
tölgy 1. gen contr	$\tilde{x}$	253,09	393,74	6,43	225,99	455,61	17,34
	$\bar{x}$	249,84	399,75	6,36	210,52	449,97	17,35
	$\sigma$	22,19	22,16	0,53	36,91	12,89	0,35
tölgy n. gen	$\tilde{x}$	263,86	443,81	17,36	206,59	428,89	23,29
	$\bar{x}$	275,09	422,90	15,75	222,50	438,46	24,11
	$\sigma$	102,89	56,91	8,51	57,79	18,02	9,03
tölgy n. gen contr	$\tilde{x}$	286,45	432,67	9,76	204,39	430,54	24,44
	$\bar{x}$	280,96	432,19	9,94	194,18	427,38	25,50
	$\sigma$	26,19	3,16	1,30	58,55	9,00	3,08

F7. táblázat. Az egyes SOM-frakciók páros U-tesztjének p-értékei. (ns = nem szignifikáns)

Mintavételi hely besorolása, szint	„Nógrád”			„Somogy”		
	p-érték fLF	p-érték oLF	p-érték HF	p-érték fLF	p-érték oLF	p-érték HF
akác 1. gen. – contr. 0–5 cm	ns	ns	ns	0,036	0,036	ns
akác 1. gen. – contr. 5–10 cm	ns	ns	ns	ns	ns	0,036
akác n. gen. – contr. 0–5 cm	0,036	0,036	0,036	0,036	0,036	ns
akác n. gen. – contr. 5–10 cm	ns	0,036	0,036	0,036	0,036	0,036
tölgy 1. gen. – contr. 0–5 cm	0,036	0,036	0,036	0,036	0,036	0,036
tölgy 1. gen. – contr. 5–10 cm	0,036	0,036	ns	ns	ns	ns
tölgy n. gen. – contr. 0–5 cm	0,036	0,036	0,036	ns	ns	ns
tölgy n. gen. – contr. 5–10 cm	ns	ns	ns	ns	ns	ns
akác 1. gen. – akác n. gen. 0–5 cm	ns	ns	0,032	ns	ns	0,032
akác 1. gen. – akác n. gen. 5–10 cm	0,016	ns	0,0079	0,0079	0,0079	0,0079
tölgy 1. gen. – tölgy n. gen. 0–5 cm	0,0079	0,016	0,0079	0,0079	0,0079	0,0079
tölgy 1. gen. – tölgy n. gen. 5–10 cm	ns	ns	ns	0,0079	ns	ns

F8. a-l. táblázatok. A SOM adatok modellezéshez tartozó kereszt-validáció R-értékeinek (Pearson-féle korrelációs együttható), és a multikollinearitás-tesztek áttekintése.

(Magyarázat:  $VIF < 5$  alacsony korreláció,  $5 < VIF < 10$  mérsékelt korreláció, és  $VIF > 10$  magas, nem tolerálható korreláció)

*Az fLF-frakció modelljeinek tesztjei; táblázat a-d:*

multikollinearitás-próba,  $m_{fLF} < 0-5 \text{ cm} >$

Prediktorok	VIF
Szerves szén ( $C_{org}$ ) % [m/m]	4,78
Agyag % [m/m]	2,06
$C_{org}/N_{össz}$ arány	3,86
Fafaj	3,30
C/N arány fLF	1,74

R-értékek, 10-fold Cross-Validation,  $m_{fLF} < 0-5 \text{ cm} >$

Min.	Medián	Átlag	Max.	Értékelés
0,0058	0,4690	0,4307	0,7611	alacsony megbízhatóság

multikollinearitás-próba,  $m_{fLF} < 5-10 \text{ cm} >$

Prediktorok	VIF
C/N arány fLF	1,21
Fafaj	1,23
HF-mennyiség ( $m_{HF}$ ) [ $g_{HF}$ ]	1,11

R-értékek, 10-fold Cross-Validation,  $m_{fLF} < 5-10 \text{ cm} >$

Min.	Medián	Átlag	Max.	Értékelés
0,0003	0,1891	0,1913	0,5186	alacsony megbízhatóság

*Az oLF-frakció modelljeinek tesztjei; táblázat e-h:*

multikollinearitás-próba,  $m_{oLF} < 0-5 \text{ cm} >$

Prediktorok	VIF
Agyag % [m/m]	1,31
Szerves szén ( $C_{org}$ ) % [m/m]	1,75
Vizes pH ( $pH_{H_2O}$ )	1,12
Fafaj	1,67

R-értékek, 10-fold Cross-Validation,  $m_{oLF} <0-5 \text{ cm}>$

Min.	Medián	Átlag	Max.	Értékelés
0,1410	0,5440	0,5482	0,8823	megfelelő megbízhatóság

multikollinearitás-próba,  $m_{oLF} <5-10 \text{ cm}>$

Prediktorok	VIF
Szerves szén ( $C_{org}$ ) % [m/m]	1,07
Fafaj	1,07

R-értékek, 10-fold Cross-Validation,  $m_{oLF} <5-10 \text{ cm}>$

Min.	Medián	Átlag	Max.	Értékelés
0,2471	0,5577	0,5850	0,8196	megfelelő megbízhatóság

*A HF-frakció modelljeinek tesztjei; táblázat i-l:*

multikollinearitás-próba,  $m_{HF} <0-5 \text{ cm}>$

Prediktorok	VIF
Szerves szén ( $C_{org}$ ) % [m/m]	1,16
Fafaj	1,16

R-értékek, 10-fold Cross-Validation,  $m_{HF} <0-5 \text{ cm}>$

Min.	Medián	Átlag	Max.	Értékelés
0,01536	0,2113	0,2291	0,5660	alacsony megbízhatóság

multikollinearitás-próba,  $m_{HF} <5-10 \text{ cm}>$

Prediktorok	VIF
Agyag % [m/m]	1,33
Nitrogéntart. ( $N_{össz}$ ) % [m/m]	1,29
Fafaj	1,08

R-értékek, 10-fold Cross-Validation,  $m_{HF} <5-10 \text{ cm}>$

Min.	Medián	Átlag	Max.	Értékelés
0,3438	0,6461	0,6083	0,9018	megfelelő megbízhatóság

F9. a. táblázat. A digitális dinamikus képanalízis legfontosabb nyers adatainak áttekintése.

A szfericitás-kritériummal korrigált  $D_5$ ,  $D_{50}$ , és  $D_{95}$  kvantilisekhez tartozó szermcseméreték  $\mu$ -ben. Az „agg” az aggregált (kezeletlen) mintákkal, míg az US1 és US2 azok ultrahangos roncsolását (1-es és 2-es szint) követően végzett mérésekre vonatkozik. Az aggregált minták esetében feltüntettük a *VMD*-méreteket is, szintén  $\mu$ -ben.

Sorsz.	$D_5$ _agg	$D_{50}$ _agg	$D_{95}$ _agg	<i>VMD</i> _agg	$D_5$ _US1	$D_{50}$ _US1	$D_{95}$ _US1	$D_5$ _US2	$D_{50}$ _US2	$D_{95}$ _US2
001	39,88	132,42	544,73	186,58	23,56	72,06	235,20	22,02	62,08	163,43
002	44,01	138,69	949,72	252,69	23,55	79,70	715,72	21,64	65,28	319,88
003	41,85	149,02	780,00	243,46	26,84	78,29	279,66	24,68	69,60	251,95
006	39,70	123,26	452,43	166,26	26,94	73,09	188,51	24,63	64,84	151,71
007	40,53	121,86	411,16	158,41	22,64	68,39	166,38	21,26	58,24	138,42
008	39,53	128,50	484,88	174,17	25,86	71,20	175,58	23,98	63,45	147,31
011	39,63	130,78	505,38	182,55	23,11	68,35	167,56	21,82	60,56	146,02
012	37,94	126,80	682,67	207,66	20,98	64,42	164,47	19,70	54,35	136,84
013	40,79	129,82	507,25	183,92	26,38	72,33	181,65	24,04	63,46	143,87
016	43,23	138,22	497,80	186,98	27,98	78,22	203,78	25,71	70,20	168,78
017	36,19	130,46	529,42	183,78	23,46	74,60	245,41	22,17	65,94	181,34
018	39,07	147,03	1380,43	289,38	27,23	77,96	238,00	25,72	72,75	1044,53
021	37,18	132,85	452,18	172,61	23,01	67,48	165,89	22,01	61,28	152,06
022	34,79	124,02	402,07	159,12	22,38	67,86	165,25	21,41	61,11	148,98
023	39,01	131,65	442,32	170,87	26,73	74,51	184,93	24,79	67,26	156,90
026	37,57	133,50	469,65	176,58	25,74	72,44	189,74	24,00	64,47	152,95
027	34,54	182,97	865,52	284,93	20,71	63,23	179,16	19,88	55,94	152,16
028	37,57	132,90	414,58	168,31	24,92	68,62	162,93	23,61	62,92	145,75
031	40,14	141,27	1284,48	286,96	22,73	68,54	232,76	21,61	61,48	446,16
033	39,66	128,56	480,51	178,22	25,82	72,35	219,91	23,80	63,04	157,15
034	41,73	120,23	474,12	166,04	25,84	73,74	259,52	23,62	63,60	163,46
036	42,28	122,20	535,24	180,58	26,77	74,03	190,54	24,30	64,28	151,92
037	40,17	118,94	456,90	161,26	22,79	69,56	196,84	21,33	59,31	154,84
039	40,86	117,87	433,92	163,60	25,77	73,05	185,09	23,80	64,88	190,10
040	36,73	198,31	813,32	288,56	24,27	83,80	561,20	23,19	76,24	741,71
042	37,03	139,05	782,89	236,46	27,69	81,60	800,29	25,41	71,33	180,11
043	40,10	122,99	410,39	158,28	23,09	74,64	190,08	21,82	66,75	176,35
045	36,90	126,77	494,68	176,41	26,15	73,62	187,92	24,74	67,96	154,58
046	42,31	120,44	332,73	144,76	23,15	73,42	165,37	21,78	65,65	157,84
048	41,09	126,93	413,26	162,77	26,79	74,79	168,72	24,68	67,28	152,17
097	35,36	149,00	592,97	219,89	23,94	67,11	260,80	22,25	55,98	156,60
098	32,19	170,77	801,27	260,44	20,91	56,98	204,92	20,16	46,61	131,86
099	35,18	166,77	703,24	241,96	23,90	64,85	254,39	22,39	55,82	164,45
102	35,06	143,04	485,22	180,76	21,83	56,86	179,34	20,75	45,71	119,64
103	32,74	150,51	529,21	196,20	20,75	54,10	163,89	20,00	44,40	119,36
104	36,31	142,71	526,81	192,36	23,12	61,35	180,12	21,69	51,11	127,25
107	37,05	140,94	472,18	181,19	23,48	62,80	176,61	21,84	51,47	125,34
108	31,09	153,33	619,35	211,22	19,53	53,83	167,55	17,34	43,69	127,02
109	36,47	134,84	449,25	172,17	23,20	62,19	180,14	21,67	51,09	127,07
112	36,98	151,98	565,42	215,02	21,95	58,85	177,66	20,87	47,80	121,14
114	38,40	124,61	438,17	164,36	23,36	64,58	190,53	21,56	51,81	127,60
115	39,21	120,93	439,81	160,86	21,55	62,68	187,02	20,31	48,41	131,10
117	40,51	125,05	460,25	169,91	23,87	68,62	192,60	21,78	54,24	141,75
118	38,03	124,61	549,10	190,97	21,56	64,49	245,00	20,19	48,44	137,67
120	41,54	134,71	451,95	171,37	23,94	69,21	222,35	21,83	54,42	148,16
121	33,67	207,42	750,89	283,56	22,73	71,42	271,01	21,68	62,21	187,39
122	34,47	257,65	1061,66	381,12	21,22	76,59	401,38	20,18	64,14	244,49
123	39,56	231,08	838,91	315,38	26,56	95,58	350,28	24,47	78,57	291,30

126	34,74	189,16	791,70	273,79	23,59	71,73	292,00	22,52	64,67	242,70
127	30,31	189,91	795,44	266,28	20,46	67,03	229,73	19,72	60,81	243,83
128	35,10	236,26	1075,44	365,63	22,93	71,22	247,23	21,93	62,96	185,48
131	35,31	184,00	761,74	263,81	22,79	70,76	231,39	21,40	59,82	180,52
132	37,53	398,54	1103,10	479,29	18,13	62,29	179,47	16,93	55,97	227,90
133	35,04	197,38	803,09	290,44	22,97	69,40	203,83	21,84	61,58	166,03
136	36,41	185,29	805,70	266,53	24,21	83,71	385,81	22,44	68,54	259,74
138	35,79	157,81	657,33	227,60	24,08	73,58	240,58	22,66	63,76	187,35
139	36,58	169,56	654,38	234,38	24,66	81,87	283,40	22,87	67,90	201,72
141	34,96	166,76	649,95	232,01	23,29	71,89	238,67	22,31	64,42	252,09
142	34,77	170,39	631,05	224,63	22,61	69,51	214,78	21,59	60,66	182,81
144	34,72	161,08	665,03	226,55	23,70	72,88	240,85	22,40	62,62	185,44
145	34,69	175,22	666,29	239,61	23,55	77,27	370,01	22,32	66,96	516,66
146	36,17	282,39	1152,82	420,67	22,16	91,10	768,08	21,38	80,30	1197,56
147	31,08	183,58	734,09	254,54	22,38	68,20	423,52	21,33	57,67	391,21
150	28,75	183,73	759,95	257,27	21,16	59,90	255,60	20,44	51,64	233,49
151	29,82	189,38	694,97	256,82	21,88	72,53	351,17	20,81	60,13	367,84
152	31,01	174,29	747,71	251,36	22,29	63,88	276,57	21,30	55,07	293,80
155	29,06	191,49	899,26	292,22	21,09	61,26	243,77	20,27	50,86	202,53
156	31,75	388,45	1089,07	457,49	17,57	61,45	294,37	15,81	48,27	281,10
157	31,78	182,59	701,72	250,08	22,46	65,38	303,25	21,23	54,17	247,10
160	30,43	194,30	779,89	270,27	21,43	73,58	360,25	20,53	62,11	420,87
162	34,27	200,25	720,44	272,36	23,04	78,53	395,96	21,80	67,11	404,35
163	30,90	163,70	631,91	226,76	20,89	71,39	332,37	19,73	58,90	279,88
165	32,63	182,86	696,54	254,18	22,64	72,83	342,24	21,48	62,38	371,23
166	29,73	162,33	747,60	237,08	20,73	67,39	388,26	19,58	55,67	324,47
168	28,21	157,02	641,16	222,43	21,20	68,25	332,02	20,25	55,33	277,99
169	34,42	244,06	858,54	324,77	23,83	91,54	432,59	22,40	75,53	362,93
170	34,49	198,71	817,08	272,97	24,41	102,63	399,78	22,87	83,53	545,14
171	31,95	208,66	799,08	284,38	23,10	79,03	370,18	21,95	67,89	275,58
174	33,23	201,68	701,40	259,27	22,72	77,57	322,68	21,77	69,02	372,20
175	32,19	222,37	969,11	325,65	21,70	79,73	311,01	20,73	69,37	311,68
176	28,48	182,67	777,41	260,34	20,99	64,56	245,99	20,27	56,32	209,46
179	31,90	199,55	985,40	288,10	22,13	76,84	274,01	21,19	67,77	287,01
180	39,19	271,20	1050,59	397,89	20,96	78,66	343,85	20,00	67,59	324,50
181	30,01	177,82	693,82	250,45	21,07	64,47	232,27	20,25	55,69	228,13
184	39,66	164,40	570,47	211,38	22,94	87,65	369,69	21,53	74,66	386,93
186	38,93	160,18	567,86	210,92	22,43	84,55	443,66	21,16	71,61	416,13
187	35,73	166,21	596,19	219,58	22,62	84,11	372,56	21,38	71,88	394,21
189	36,78	156,60	599,30	214,42	22,87	90,67	434,72	21,46	75,86	450,97
190	31,90	164,98	573,62	213,32	21,55	80,07	359,35	20,36	66,90	350,64
192	31,69	170,50	704,32	240,16	22,47	87,90	461,87	21,19	73,90	441,02
193	34,88	298,11	946,29	375,25	21,95	110,86	1007,30	20,61	79,08	529,69
194	54,19	594,56	1391,44	617,61	21,24	135,12	984,22	20,21	112,41	1083,78
195	37,34	282,79	1012,36	383,41	22,94	112,64	621,20	21,90	94,13	547,79
198	32,72	235,11	747,24	306,25	22,21	103,58	584,59	21,33	86,46	563,77
199	41,24	369,41	1178,73	485,81	20,17	92,32	663,07	18,42	78,40	565,61
200	39,52	216,38	908,51	296,52	25,39	112,73	476,32	23,80	96,04	441,98
203	35,84	169,72	674,76	242,69	21,87	82,11	391,91	20,94	72,26	414,18
204	42,65	320,45	1089,39	438,47	21,46	110,98	787,53	20,33	91,23	671,02
205	38,71	187,74	631,87	242,39	25,28	103,73	398,07	23,63	86,68	471,09
208	47,07	152,37	557,69	209,44	24,11	111,64	482,34	22,23	95,05	476,38
210	46,00	147,48	490,04	186,66	26,69	112,37	500,38	24,40	101,59	528,51
211	49,91	178,28	659,70	261,67	28,75	135,08	582,33	25,49	119,83	570,50
213	48,70	149,78	467,33	186,06	26,54	110,79	469,59	24,14	97,95	441,17
214	43,98	152,48	567,27	199,24	23,67	104,17	492,47	22,23	93,63	500,28
216	44,99	159,51	584,08	212,12	26,16	106,38	490,26	24,16	95,31	523,09
217	42,93	297,17	990,94	392,09	26,52	112,01	570,80	24,93	91,72	469,07



218	46,71	464,98	1128,17	522,03	21,45	115,05	795,19	20,45	90,28	717,01
219	38,31	236,92	1098,99	345,42	25,14	101,59	481,00	24,09	87,56	527,11
222	34,68	197,47	746,56	268,75	24,05	90,89	620,02	23,13	81,52	496,74
223	33,31	252,36	1008,77	371,71	20,11	77,95	673,98	18,69	69,16	636,46
224	37,30	206,76	796,87	294,35	25,50	99,27	468,25	24,11	84,36	414,35
227	38,24	184,56	631,79	236,98	24,31	93,20	1330,39	22,53	73,73	421,95
228	39,89	224,97	839,22	308,62	20,97	91,75	493,32	19,88	75,41	491,79
229	37,44	182,99	618,29	231,43	24,59	93,57	405,47	23,18	80,16	369,53
232	42,13	190,77	852,50	271,27	23,64	114,60	717,60	22,57	109,55	1440,31
234	45,29	173,59	745,79	257,41	25,05	96,73	399,98	23,23	81,82	494,42
235	43,81	156,39	659,99	231,51	22,76	91,53	400,79	21,53	81,28	509,88
237	45,67	162,74	623,24	221,14	25,10	100,65	418,06	23,09	83,09	403,75
238	43,76	159,23	576,74	212,08	22,66	98,94	571,99	21,53	88,59	511,15
240	43,24	157,79	574,87	209,37	23,85	93,99	459,86	22,20	79,29	457,98

F9. b. táblázat. Az elsődleges ásványi szemcsék szfericitás-kritériummal korrigált  $D_5$ ,  $D_{50}$ , és  $D_{95}$  kvantilisokhoz tartozó szemcseméretei  $\mu\text{m}$ -ben, valamint a  $VMD$ -mérétek szintén  $\mu\text{m}$ -ben.

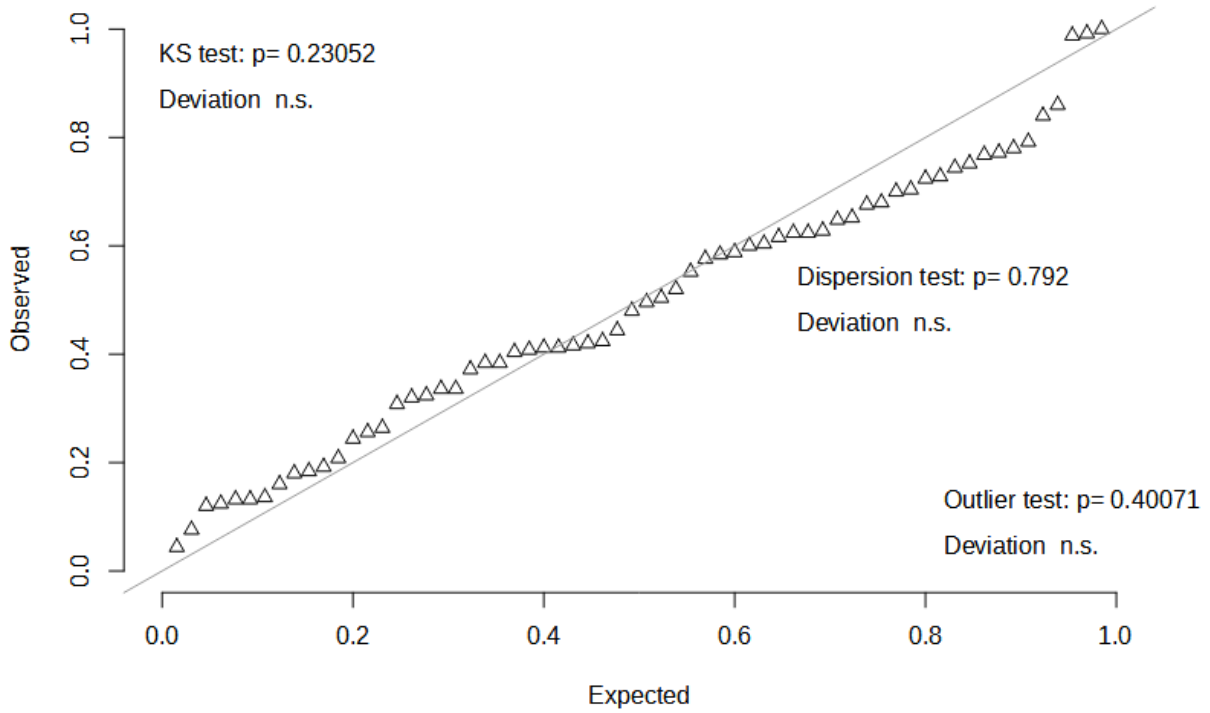
Sorsz.	$D_5_{ref}$	$D_{50}_{ref}$	$D_{95}_{ref}$	$VMD_{ref}$
010	48,91	93,37	184,51	115,63
025	36,55	81,10	166,51	111,22
035	49,25	104,16	438,39	137,75
044	36,24	85,61	165,35	97,14
106	46,78	107,72	446,42	148,86
116	48,47	114,76	461,08	145,74
130	49,19	103,20	285,00	133,60
140	45,71	161,04	739,31	204,56
154	44,91	120,59	613,49	246,67
164	57,45	138,74	377,41	188,65
178	46,05	102,52	343,48	179,45
188	47,68	101,11	242,78	251,63
202	46,38	104,55	276,14	272,27
212	45,46	112,28	692,22	288,39
226	58,04	204,08	853,79	260,53
236	56,03	134,19	344,80	193,74

f1. a-f. ábra. „Quantile-quantile plot”-ok az LMM-ek reziduálisainak normalitás-tesztjéhez.

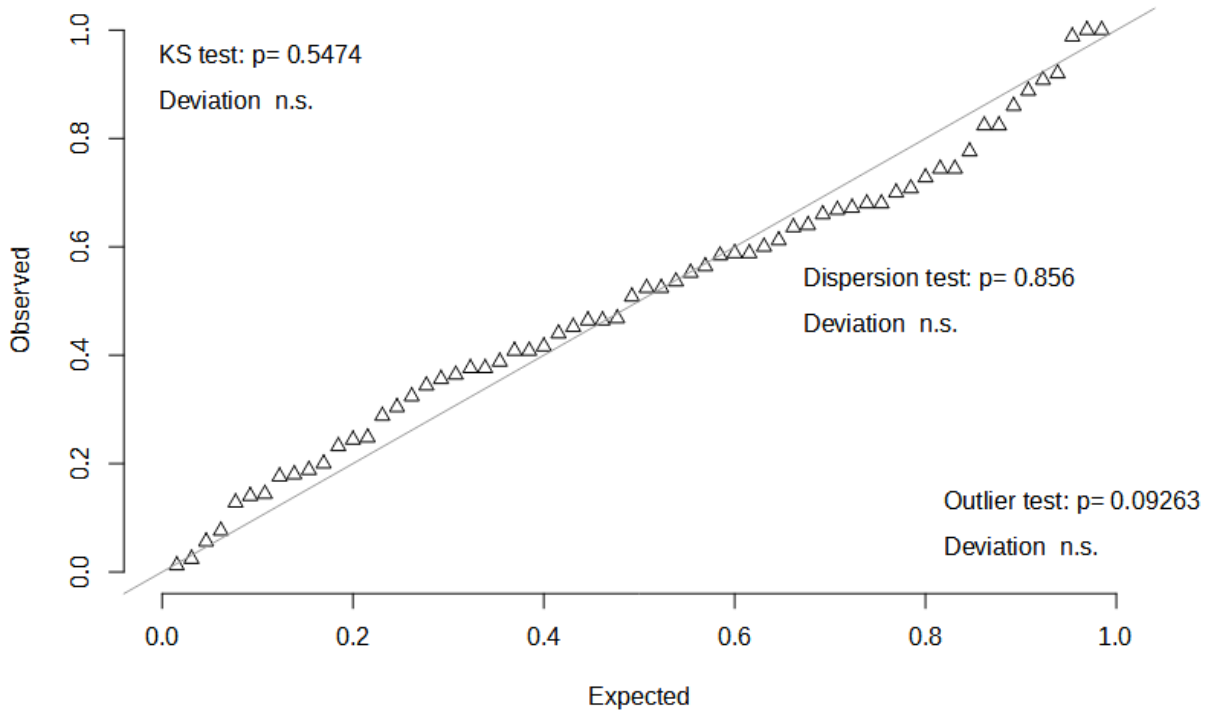
Az ábrákon látható jelölések:

- KS test (Kolmogorov–Szmirnov próba): a normális eloszlástól való eltérés tesztelése (t-próba);
- Dispersion test: teszt annak a vizsgálatára, hogy a reziduálisok megoszlása (az egyes adatpontok) szignifikánsan eltér(nek)-e a normálistól (vagyis a  $45^\circ$  -os,  $y = x$  egyenestől);
- Outlier teszt: esetleges kiugró értékek tesztje.

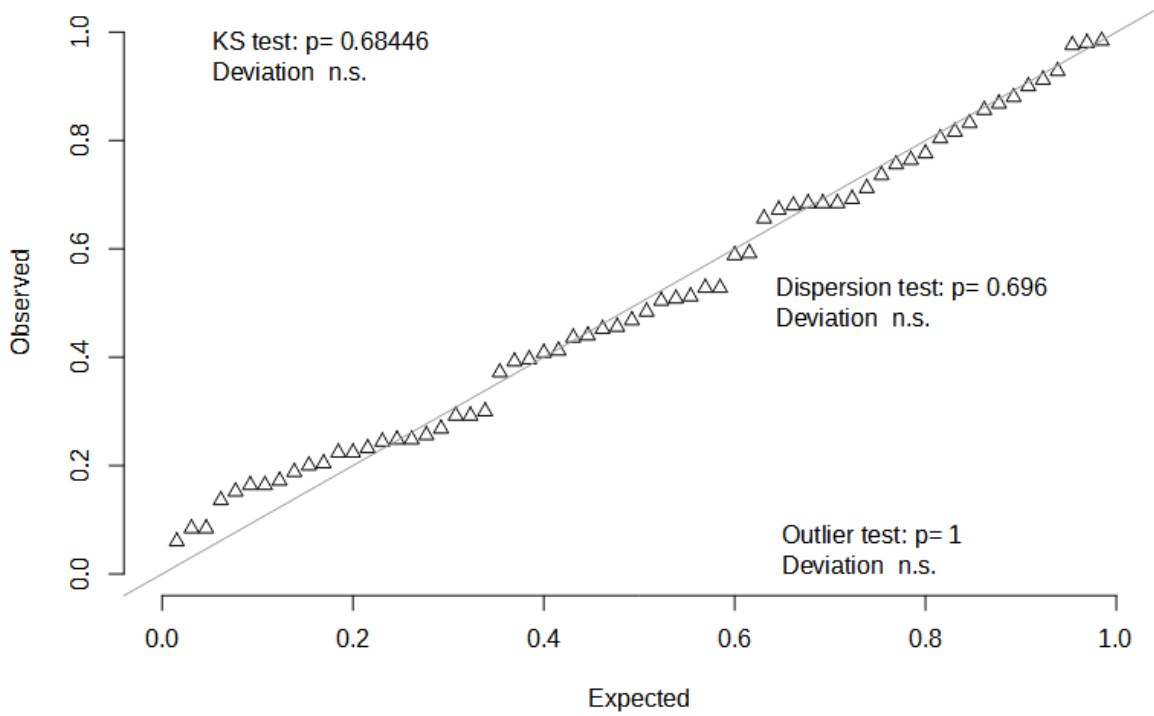
QQ plot residuals -  $m_{RLF} < 0-5 \text{ cm} >$



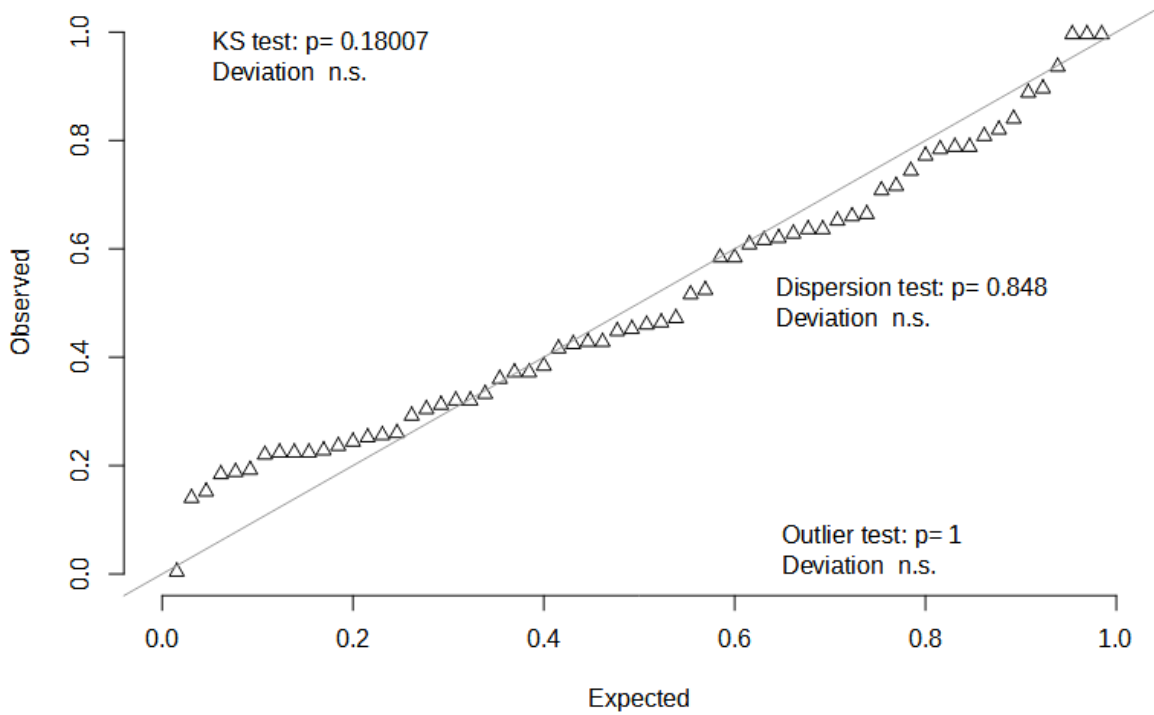
QQ plot residuals -  $m_{RLF} < 5-10 \text{ cm} >$



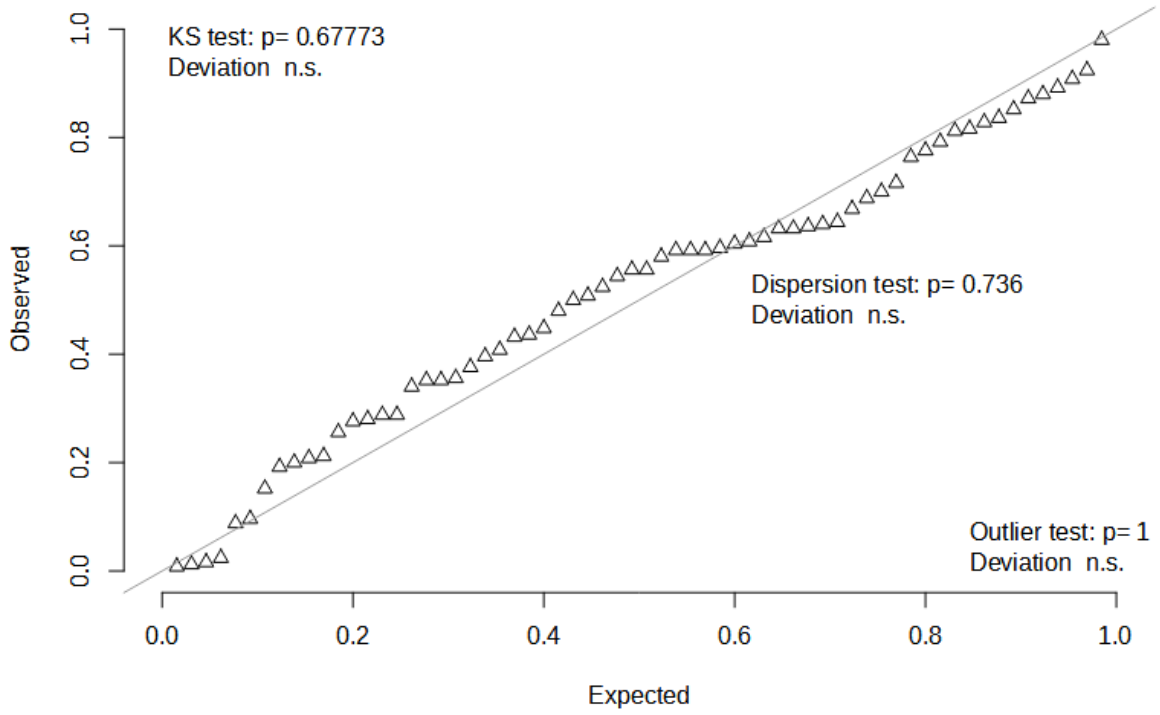
QQ plot residuals -  $m_{oLF} < 0-5 \text{ cm} >$



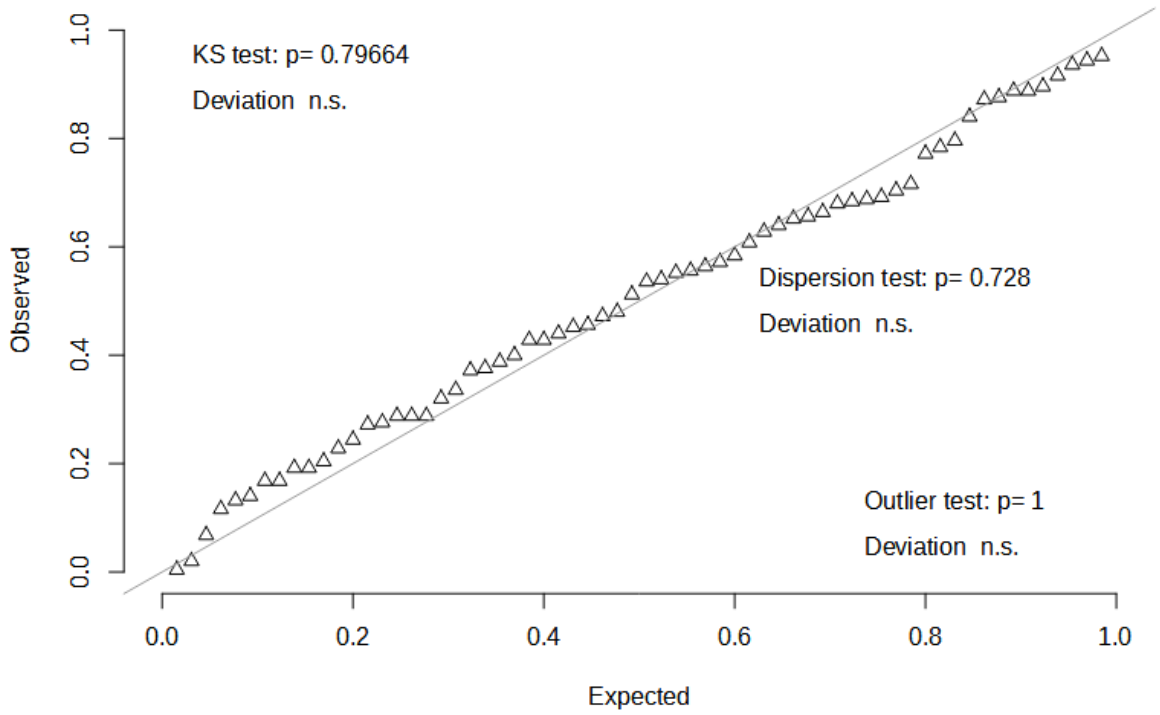
QQ plot residuals -  $m_{oLF} < 5-10 \text{ cm} >$



QQ plot residuals -  $m_{HF} <0-5 \text{ cm}>$

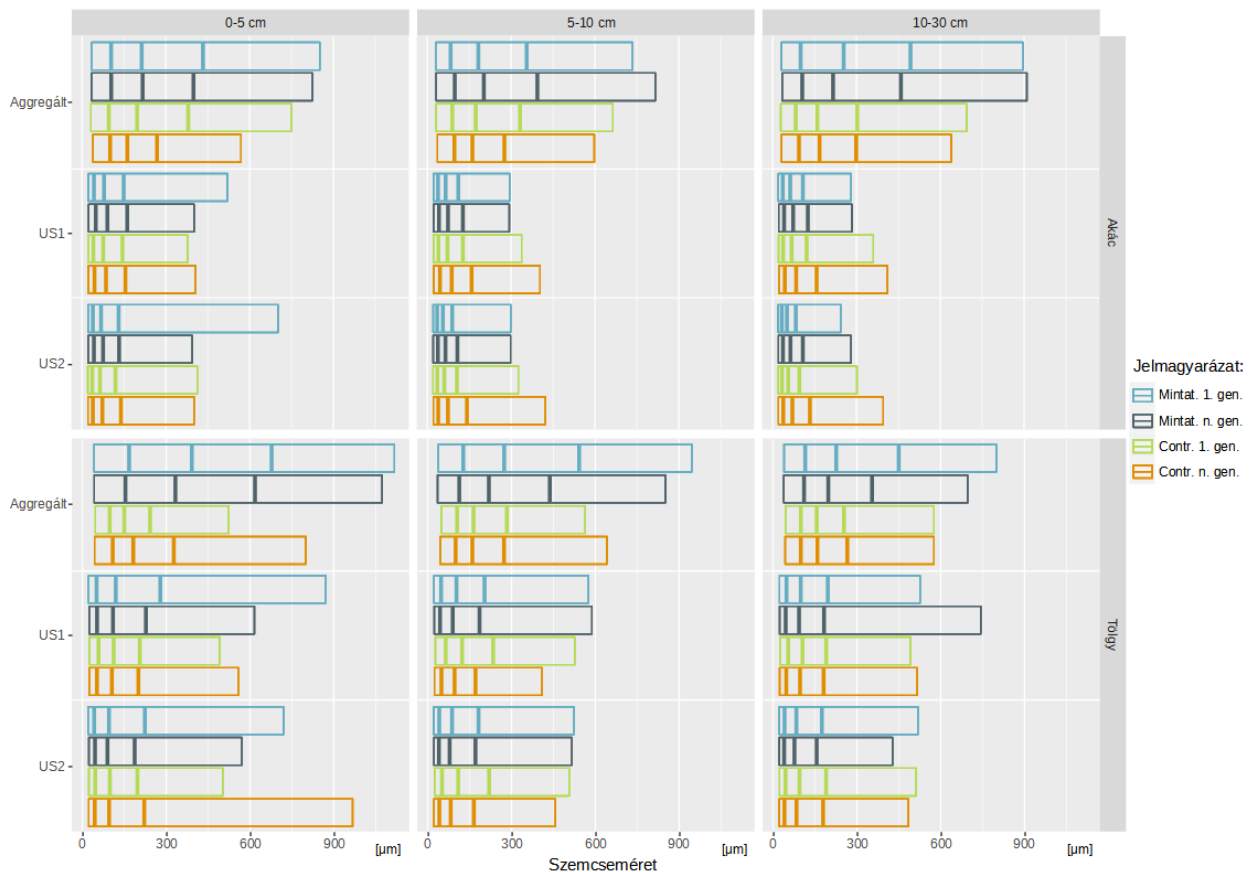


QQ plot residuals -  $m_{HF} <5-10 \text{ cm}>$



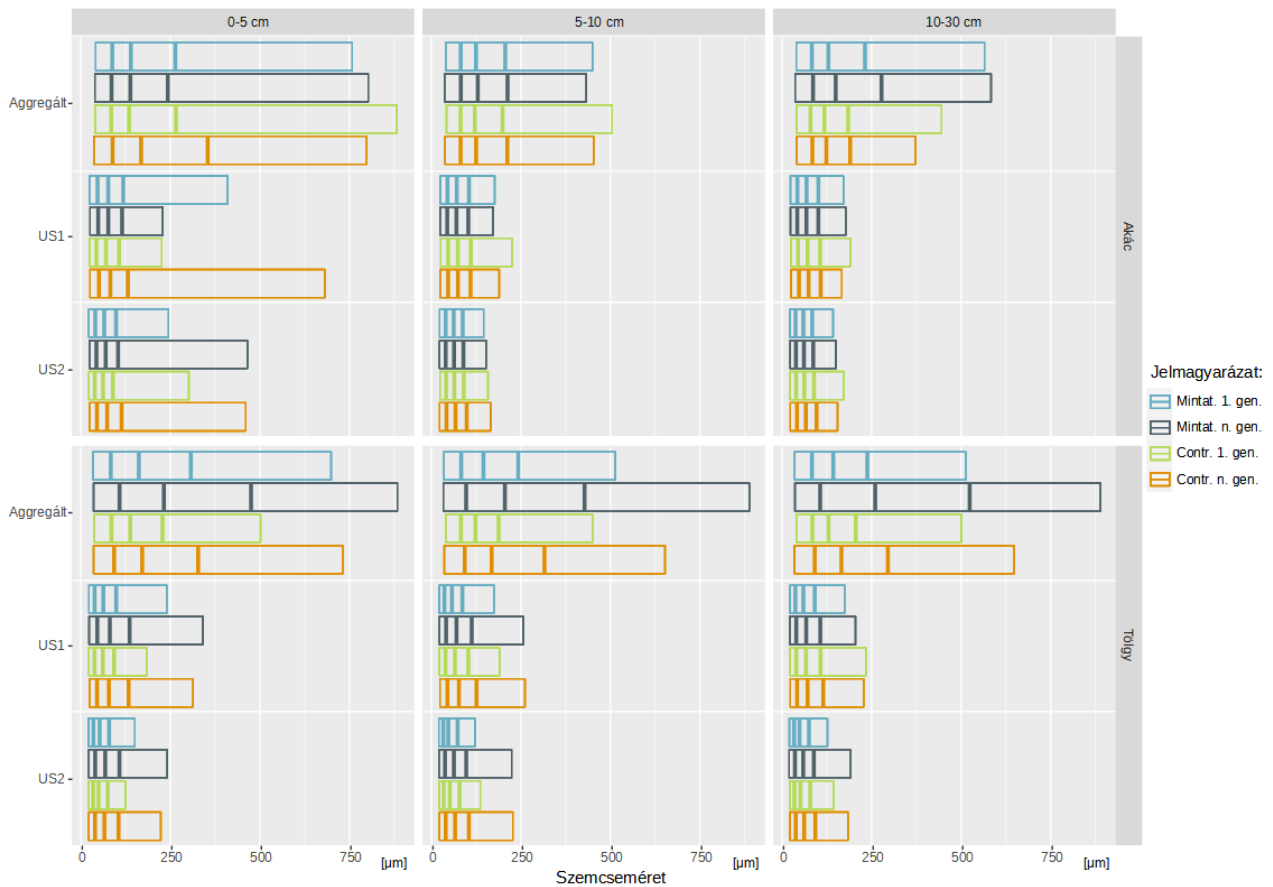
f2. a. ábra. A szemcseméret megoszlása a "nógrádi" tölgy és akác mintaterületeken, illetve a hozzájuk tartozó kontrollterületeken (vízszintesen), a három vizsgált szintben (függőlegesen). Az egyes grafikonok felső harmadában az ép aggregátumok, a középső harmadban az 1. ultrahangos roncsolás utáni, míg az alsó harmadban a 2. ultrahangos roncsolást követő méretmegoszlások láthatóak. Az egy-egy kategóriát jelölő lécre felhordott öt függőleges balról jobbra haladva az egyes megoszlási-sűrűségkvintiliseket jelölik ( $D_5$ ,  $D_{25}$ ,  $D_{50}$ ,  $D_{75}$  és  $D_{95}$ ).

„Nógrád”



f2. b. ábra. A szemcseméret megoszlása a "somogyi" tölgy és akác mintaterületeken, illetve a hozzájuk tartozó kontrollterületeken (vízszintesen), a három vizsgált szintben (függőlegesen). Az egyes grafikonok felső harmadában az ép aggregátumok, a középső harmadban az 1. ultrahangos roncsolás utáni, míg az alsó harmadban a 2. ultrahangos roncsolást követő méretmegoszlások láthatóak. Az egy-egy kategóriát jelölő lécre felhordott öt függőleges balról jobbra haladva az egyes megoszlási-sűrűségkvintiliseket jelölik ( $D_5$ ,  $D_{25}$ ,  $D_{50}$ ,  $D_{75}$  és  $D_{95}$ ).

„Somogy”



f3. ábra. Az elsődleges ásványi szemcsék méretmegoszlása valamennyi minta- és kontrollterületen, az 5–10 cm-es szintben, a "nógrádi" és a "somogyi" régióban. Az egy-egy kategóriát jelölő lécre felhordott öt függőleges balról jobbra haladva az egyes megoszlási-sűrűségkvintiliseket jelölik ( $D_5$ ,  $D_{25}$ ,  $D_{50}$ ,  $D_{75}$  és  $D_{95}$ ).

