

Doktori (PhD) Értekezés
Soproni Egyetem
Roth Gyula Erdészeti és Vadgazdálkodási Tudományok Doktori Iskola
Az erdőgazdálkodás biológiai alapjai (PhD) Program

**A SZENT ANNA-TÓ KRÁTERÉT BORÍTÓ ERDŐK
HATÁSA A TÓ HIDROLÓGIAI JELLEMZŐIRE,
JAVASLATOK AZ ERDŐGAZDÁLKODÁSRA**

Készítette:
SZMOLKA PÉTER

Témavezető:
Dr. habil. FRANK NORBERT
egyetemi docens

Sopron
2023

**A SZENT ANNA-TÓ KRÁTERÉT BORÍTÓ ERDŐK HATÁSA A TÓ HIDROLÓGIAI
JELLEMZŐIRE, JAVASLATOK AZ ERDŐGAZDÁLKODÁSRA**

Értekezés doktori (PhD) fokozat elnyerése érdekében

Írta:
Szmolka Péter

Készült a Soproni Egyetem Roth Gyula Erdészeti és Vadgazdálkodási Tudományok
Doktori Iskola

Az erdőgazdálkodás biológiai alapjai (PhD) programja keretében

Témavezető(k): Dr. habil. Frank Norbert

Az értekezés témavezetőként elfogadásra javasolt: igen / nem

témavezető(k) aláírása

A komplex vizsga időpontja: 20.....év.....hónap.....nap

A komplex vizsga eredménye%

Az értekezés bírálóként elfogadásra javasolt (igen /nem)

1. bíráló Dr. igen /nem

(aláírás)

2. bíráló Dr. igen /nem

(aláírás)

Az értekezés nyilvános védésének eredménye:.....%

Kelt Sopron, 20.....év.....hónap.....nap

.....
a Bíráló Bizottság elnöke

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

.....
Az EDHT elnöke

NYILATKOZAT

Alulírott **Szmolka Péter**, jelen nyilatkozat aláírásával kijelentem, hogy a „**A Szent Anna-tó kráterét borító erdők hatása a tó hidrológiai jellemzőire, javaslatok az erdőgazdálkodásra**” 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.¹

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

¹ 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	7
Abstract	8
1. BEVEZETÉS	9
1.1. Előzmények, problémafelvetés	9
1.2. Célkitűzések.....	10
2. IRODALMI ÁTTEKINTÉS	11
2.1. A kutatási terület természetföldrajzi viszonyai	11
2.1.1. Elhelyezkedés	11
2.1.2. Geológia és geomorfológia	12
2.1.3. Klíma.....	13
2.1.4. Talaj	15
2.1.5. Növényzet	16
2.1.5.1. A jelenlegi növényzet.....	16
2.1.5.2. A növényzet múltbeli alakulása	20
2.1.6. Hidrológia	23
2.1.6.1. Batimetria	23
2.1.6.2. A tó vizének jellemzői.....	27
2.2. Természetvédelem	28
2.3. Erdőgazdálkodás.....	29
2.3.1. Jogi háttér.....	29
2.3.2. A hatályos üzemterv.....	30
3. ANYAG ÉS MÓDSZER.....	33
3.1. Állományszerkezetek vizsgálata.....	33
3.1.1. Állományszerkezetek vizsgálatának célja.....	33
3.1.2. Állományszerkezetek vizsgálatának munkamódszere	33
3.1.3. Állományszerkezetek vizsgálata során alkalmazott statisztikai módszerek	36
3.2. A talajinfiltráció sebességének vizsgálata az egyes állományszerkezetek és felszínborítási kategóriák esetében	36
3.2.1. Talajinfiltráció-sebesség vizsgálatának célja	36
3.2.2. A talajinfiltráció sebességének vizsgálati módszere	37
3.2.2.1. A mintaterületek kiválasztása.....	37
3.2.2.2. Az infiltrációs ráta meghatározása	38

3.2.2.3. Talaj fizikai-féleség, térfogattömeg, váztartalom és szerves szén-tartalom meghatározások.....	40
3.2.2.4. A talaj tömörségének a meghatározása	41
3.2.3. A talajinfiltráció sebességének vizsgálata során alkalmazott statisztikai módszerek	41
3.3. A Szent Anna-tó vízmérleg komponenseinek vizsgálata	42
3.3.1. A vízmérleg komponensek vizsgálatának célja	42
3.3.2. A vízmérleg komponenseinek vizsgálati módszere	42
3.3.3. A vízmérleg komponenseinek vizsgálata során alkalmazott statisztikai módszer..	45
3.4. A szabad víz megjelenésének vizsgálata a talajban különböző faállományok alatt.....	47
3.4.1. A szabad víz megjelenését vizsgáló kutatás célja.....	47
3.4.2. A szabad víz megjelenésének vizsgálati módszere.....	48
3.4.2.1. A mintaterületek kiválasztása.....	48
3.4.2.2. A szabad víz megjelenéseinek kimutatása	49
3.4.2.3. A csapadékmennyiségek mérése	50
3.4.3. A szabad víz megjelenésének vizsgálata során alkalmazott statisztikai módszerek	51
4. EREDMÉNYEK ISMERTETÉSE ÉS ÉRTÉKELÉSE	52
4.1. Állományszerkezetek vizsgálati eredményeinek ismertetése és értékelése.....	52
4.1.1. Állományfelmérések eredményei	52
4.1.1.1. Középkorú bükkösök.....	52
4.1.1.2. Idős bükkösök	55
4.1.1.3. Vegyeskorú bükkösök	57
4.1.1.4. Középkorú lucosok.....	60
4.1.1.5. Lécek idős bükkösben.....	64
4.1.1.6. Koronarészarány vizsgálata a talajnedvesség mérési helyein	64
4.1.1.7. Koronakezdet magasságának vizsgálata a talajnedvesség mérési helyein.....	65
4.1.2. Állományfelmérések eredményeinek értékelése.....	67
4.2. Talajinfiltrációs vizsgálatok eredményeinek ismertetése és értékelése.....	69
4.2.1. Talajinfiltrációs vizsgálatok eredményei	69
4.2.2. Talajinfiltrációs vizsgálatok eredményeinek értékelése	74
4.3. A tó vízmérleg-vizsgálat eredményeinek ismertetése és értékelése	78
4.3.1. A tó vízmérleg-vizsgálatának eredményei.....	78
4.3.2. A tó vízmérleg-vizsgálat eredményeinek értékelése.....	81

4.4. A szabad víznek a faállományok talajában történő megjelenését vizsgáló kutatás eredményeinek ismertetése és értékelése.....	82
4.4.1. A szabad víz megjelenésének vizsgálati eredményei	82
4.4.2. A szabad víz megjelenését vizsgáló kutatás eredményeinek értékelése	87
5. MEGVITATÁS ÉS JAVASLATOK AZ ERDŐGAZDÁLKODÁSRA	90
5.1. Következtetések a vizsgálati eredmények alapján.....	90
5.2. Az erdőgazdálkodási javaslatok megalapozása	93
5.3. Erdőgazdálkodási javaslatok	102
5.4. Gazdálkodási javaslatok az aktuális üzemterv érvényességi időszakára.....	104
6. ÖSSZEFOGLALÁS	106
7. ÚJ TUDOMÁNYOS EREDMÉNYEK, TÉZISEK	110
Köszönetnyilvánítás	112
Irodalomjegyzék.....	113
Táblázatok jegyzéke	118
Ábrák jegyzéke.....	119
Mellékletek jegyzéke.....	120
Mellékletek.....	121

Kivonat

„A Szent Anna-tó kráterét borító erdők hatása a tó hidrológiai jellemzőire, javaslatok az erdőgazdálkodásra” című doktori értekezésemben a Szent Anna-tó kráterének belső lejtőin található faállományokat, ezek tóra gyakorolt lehetséges hatásait vizsgáltam a tó hosszútávú fennmaradásának, fenntarthatóságának problematikájával összefüggésben. A kutatási hely kiemelkedő jelentőségű természeti értéket képvisel és közkedvelt turisztikai célpont. Az utóbbi évszázad folyamán végzett kutatások egyértelműen a tó batimetriai jellemzőinek megváltozását bizonyítják, az elmúlt évtized során pedig a vízminőség is látványosan romlott. A hároméves adatgyűjtés során az egyes faállományokat, ezeknek és a kráterben található többi földhasználati kategóriának a tó feltöltődési folyamatában betöltött szerepét, illetve az egyes faállományok esetében ezek vízmérlegre gyakorolt lehetséges hatásait vizsgáltam.

A leggyakoribb faállomány-szerkezetek azonosítása és felmérése után összehasonlító vizsgálatokat végeztem. Szignifikáns különbségeket tártam fel az állományszerkezetben a koronarészarány és a koronakezdet-magasság tekintetében egyes kategóriák között, ezeknek szerepe lehet a különböző állományokban vizsgált folyamatok alakulására.

A faállományok és a kráterben megtalálható gyepek és földutak, ösvények esetében a talajinfiltráció sebességének vizsgálata által kerestem a választ a felszíni vízfolyások kialakulásának a lehetőségére és ezáltal a tó feltöltődésében játszott szerepére. Statisztikai szempontból szignifikáns különbségek mutathatók ki egyes faállományok közt, de az állandósult infiltrációs ráta minden állománykategóriában elég magas ahhoz, hogy ne alakulhassanak ki felszíni vízfolyások. Az erdők és az egyéb földhasználati kategóriák közt statisztikailag szignifikáns különbségek mutathatók ki, a gyepek és a földutak alacsonyabb rátái igazolják, hogy ezek a területek jelentik a tóba kerülő hordalék fő forrását.

A faállományok a felszín alatti hozzáfolyás révén befolyásolhatják a tó vízmérlegét. A felszín alatti hozzáfolyás feltétele a gravitációs víz megjelenése a talajban. Talajnedvesség megfigyelések alapján igazoltam, hogy az idős bükkösök esetében a szabad víz jelentősen kevesebb alkalommal jelent meg a talajban, mint a középkorú és a vegyeskorú bükkösök esetében.

Az erdők esetében végzett kutatások értelmezhetősége érdekében igyekeztem meghatározni a Szent Anna-tó vízmérlegének fő komponenseit. Igazoltam, hogy a tó vízszintjét döntő módon befolyásoló fő tényezők a csapadék és a párolgás. A felszínen keletkező és a felszín alatti hozzáfolyások kisebb jelentőségűek a vízmérleg szempontjából.

Az eredmények alapján javaslatokat tettem az erdőművelés adaptációjára a kráterben található erdők esetében a Szent Anna-tóval kapcsolatos összefüggések figyelembevételével.

Abstract

In my doctoral dissertation entitled “The impact of forests covering the crater of Lake Sfânta Ana on the hydrological characteristics of the lake, suggestions for forest management” I studied the tree stands situated on the inner slopes of the crater of the Sfânta Ana volcanic lake, and their possible effects in connection with the problem of the lake’s long-term sustainability. Research carried out during the last century clearly prove the change in the bathymetric properties of the lake and water quality has also deteriorated spectacularly during the last decade. During the three-year data collection, I studied the different forest stands and the role of these stands, together with other land use categories found inside the crater, in the filling process of the lake. In the case of the different forest stands I studied their possible effects on the water budget.

Following the identification and mapping of the most common forest stand categories, I studied these structures in a comparative way. I have revealed significant differences in the stand structure in terms of live crown ratio and crown base height between certain stand categories.

By studying the soil infiltration rates of different forest stands, grass plots and dirt trails in the crater, I searched for the answer to the possibility of the formation of surface rainwater flows and thus the role of these land use categories in the fill-up process of the lake. From a statistical point of view, significant differences can be found in the case of certain tree stand categories, but the steady infiltration rate in all of them is high enough to prevent the formation of surface flows. Statistically significant differences can be shown between forests and other land use categories, lower stable infiltration rates in soils of the grass plots and dirt trails prove that these land uses represent the main sources of sediment transport towards the lake.

The forests of the crater can have an influence on the water budget of the lake through the subsurface inflow. The condition for subsurface inflow is the appearance of gravitational water in the soil. Based on the soil moisture observations carried out under different stand structures, I proved that free water occurred less frequently under old even-aged beech stands in the crater than under middle-aged beech and mixed-aged beech stands.

In order to be able to interpret the research carried out in the forests of the crater, I tried to determine the main components of the water budget of Lake Sfânta Ana. I proved that the main factors affecting the water level of the lake are precipitation and evaporation. Surface and subsurface inflows are less important processes from the point of view of the water budget.

Based on the results, I made suggestions for the adaptation of the forestry practices in the case of the forests in the crater taking into account the connections with Lake Sfânta Ana.

1. BEVEZETÉS

1.1. Előzmények, problémafelvetés

A Szent Anna-tó Közép-Kelet Európa egyetlen krátertava és Erdély egyik legismertebb turisztikai látványossága (Máthé et al., 2022). A tó a Keleti Kárpátokban, a Hargita hegység legdélebbi vulkáni kúpjában, a Csomádban helyezkedik el, ikerkráterével, a Mohossal együtt a „ROSCI0248 Szent Anna-tó–Mohos-tózezláp Közösségi Jelentőségű Natura 2000 Terület” („Situl de Interes Comunitar ROSCI0248 Tinovul Mohoș–Lacul Sf. Ana”) részét képezi. A terület hivatalos kezelője a Természetvédelmi Területek Országos Ügynökségének Hargita megyei kirendeltsége. A tó Románia állami köztulajdonát képezi, a tó kráterének belső lejtőin található erdők tulajdonosa a Lázárfalvi Szent Anna Közbirtokosság.

A kutatásaim előzményét a Szent Anna-tó batimetriai jellemzőinek és vízminőségének változásai képezik, amelyek az utóbbi évtizedekben jelentős mértékűek voltak. A tó legnagyobb mélysége 1909-ben 8,3 m volt, területe 21,4 ha (Gelei, 1909), 2018-ban 7,2 méteres maximális mélységet és 19,04 hektár tófelületet dokumentáltak (Mihály, 2018). A csökkenés részben a tó vízszint-csökkenésének, részben a feltöltődési folyamatnak a lehet a következménye. A tóban lezajló feltöltődési folyamatok (szedimentáció és eutrofizáció) $2,4 \pm 0,4$ cm/év átlagértékű lineáris szedimentációs rátával jellemezhetők (Begy et al., 2011). A tó vízminősége is jelentősen megváltozott az utóbbi évtized során, a korábban kristálytisza vizű tó a $19 \mu\text{g/l}$ átlagos össz-foszfór-koncentráció alapján mezotróf, az éves átlag a-klorofill koncentráció alapján hipertróf, az átlátszóságot kifejező Secchi mélység alapján pedig, amely 2012-ben még számos esetben meghaladta a tó fizikai mélységét, eutróf állapotúvá vált, a 2019-2020. években $1,58$ méteres átlagértékkel (Máthé et al., 2022).

A krátertó vizét a felszínére hulló csapadék és a tó vízgyűjtőjét képező Szent Anna kráter belső lejtőin intenzív csapadékesemények, hóolvadás alkalmával keletkező felszíni lefolyás, valamint feltételezhető felszín alatti hozzáfolyás, beszivárgás táplálja. Állandó felszíni vízfolyásokkal nem rendelkezik (Szmolka és Frank, 2022a, b).

A holocén időszak alatt a Szent Anna-tó vízmélysége és a tó körüli vegetáció is több, jól elkülöníthető változáson ment át, időnként lucosok, máskor bükkösök alkották a domináns vegetációt a kráterben (Magyari et al., 2009). A belső kráterfal jelenleg 95,9%-ban erdővel borított, idős egykorú bükkösök, vegyeskorú bükkösök és ezek lucfenyővel és jegenyefenyővel képezett elegyei, középkorú lucfenyő és fiatal, valamint középkorú bükk–luc állományok alkotják (Szmolka és Frank, 2022a).

A tóból vett üledékminták alapján végzett paleolimnológiai kutatások eredményei alapján a Szent Anna kráter belső lejtőin található erdők és a tó szoros kölcsönhatásban vannak, a Szent Anna-tó egy érzékeny ökoszisztéma, amelynek hidrológiai, biológiai és kémiai folyamatait erősen befolyásolja a tó partján található erdő és az alatta található talaj. A tó termőképessége magasabb, ha lombhullató állományok veszik körül, és jelentősen lecsökken, ha fenyőfélék és ezek avarja található a vízparton (Magyari et al., 2009). Ez a bizonyítás, amely földtörténeti dimenzióban világít rá a tó és az erdő szoros kapcsolatára egyértelműsíti a faállományok szerepét a kráterben.

Az erdők hidrológiai és klimatológiai szerepe széleskörűen kutatott világszinten, de helyi vizsgálatok, amelyek célja a Csomád geológiai és geomorfológiai sajátosságai által meghatározott környezetben fennálló erdő-tó összefüggések feltárása lett volna, eddig nem történtek. A tó állapota és a kráterben található faállományok közti kölcsönhatásokat vizsgáló kutatások képezhetik az alapját a tó fennmaradása szempontjából legmegfelelőbb erdőgazdálkodás kialakításának a kráterben. A fő kérdéskör az, hogy erdőművelési tevékenységgel, a fafajösszetétel és egyéb állományszerkezeti jellemzők alakításával be lehet-e avatkozni olyan módon, hogy a kráter erdői a vízmérlegre és a vízminőségre gyakorolt összehatásuk tekintetében a tó hosszútávú fenntartását segítsék elő.

1.2. Célkitűzések

Munkám során a következő kérdésekre keresem a választ:

1. Milyen a Szent Anna-tó kráterben található faállományok szerkezete?
2. Vannak-e olyan eltérések az állományok közt, amelyek az állományklíma eltérő alakulását válthatják ki?
3. A különböző állományszerkezetek az erózió szempontjából milyen jelentőséggel bírnak, milyen mértékben képezhetik a tó feltöltődését okozó hordalék forrását, kimutatható-e statisztikai eltérés az egyes faállományok között, illetve a kráterben található egyéb felszínborítási kategóriákkal (gyepek, földutak) összehasonlításban?
4. Melyek a tó vízmérlegének a fő komponensei, bizonyítható-e a felszín alatti hozzáfolyás jelenléte, amely az erdők hidrológiai szerepét igazolja a kráterben?
5. A tó vízgyűjtőjét képező kráter talajaiban előfordulhat-e felszín alatti lefolyás, amely a tó vízmérlegének tápláló komponensét képezheti, és vannak-e szignifikáns eltérések az egyes faállományok között ebből a szempontból?

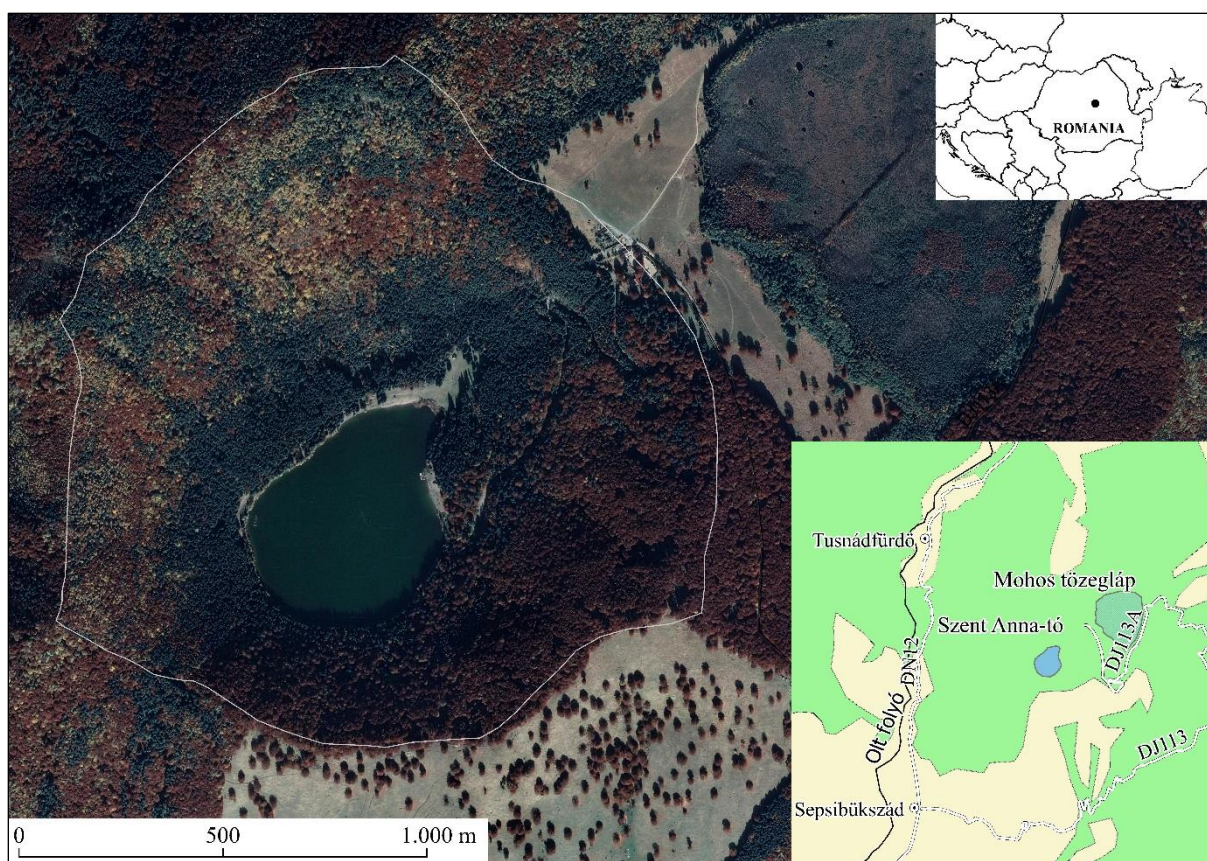
2. IRODALMI ÁTTEKINTÉS

2.1. A kutatási terület természetföldrajzi viszonyai

2.1.1. Elhelyezkedés

A vizsgálataim tárgyát képező terület, a Szent Anna-tó és a vízgyűjtőjét képező Szent Anna kráter a Keleti Kárpátok központi csoportjában elhelyezkedő Kelemen-Görgény-Hargita vulkanikus vonulatán belül a Hargita hegység délkeleti részén található Csomád vulkáni kúpban helyezkedik el (Badea et al., 1983, Oancea et al., 1987). A Csomád az Olt folyó keleti partján helyezkedik el és a Csíki, Bükszádi és Felső-háromszéki medencék határolják, erőteljesebb felszíni formáiban is eltér a szomszédos hegyektől, ez utóbbiak, a Dél-Hargita, a Csíki-havasok és Bodoki-havasok. (Karátson et al., 2022).

A kutatási hely középpontjának földrajzi koordinátái $46^{\circ}7'35''$ É-i szélesség, $25^{\circ}53'13''$ K-i hosszúság, közigazgatási szempontból pedig Hargita megyéhez, Csíkkozmás (Cozmeni) községhez tartozik. A vizsgálati terület átnézeti térképe az 1. ábrán látható.



1. ábra. A vizsgálati terület, a Szent Anna-tó krátere (műholdfelvétel: Google WMS)

2.1.2. Geológia és geomorfológia

A Hargita hegység a belső-kárpáti vulkáni vonulat legfiatalabb tagja, két nagy geomorfológiai egységre tagolható, a magasabb felszínű vulkáni kúpokra és ezek nyugati oldalának meghosszabbításában található kúplábi vulkáni platóra (Hargita-fennsík). A kúpokat többnyire tömör vulkáni kőzetek alkotják, a platót általában vulkanoklasztit építi fel (Schreiber és Unger, 2006). A K-Ar radiometriás kormeghatározások alapján a Hargita hegység vulkanizmusát 6,3–0,15 millió évesre datálták, a hegység északi részei idősebbek, déli részei a fiatalabbak, a legfiatalabb vulkán a Keleti Kárpátokban pedig a Csomád (Pécskay et al., 1995). A Hargita felső szerkezeti egységét tíz nagyobb vulkáni kúp alkotja, az azonosított kráterek közül csak a Csomádban található Szent Anna kráter maradt épen, a többi részlegesen, vagy erőteljesen lepusztult. A hegyvonulatot felépítő tömör kőzet túlnyomórészt andezit változatokból áll, a vonulat déli részén, így a Csomádban, felbukkannak a dácitok is (Schreiber és Unger, 2006). A Csomád hegység alapját az alsókréta kárpáti flis kőzetei alkotják, erre a talapzatra épült rá a Csomád vulkáni építménye (Kristó, 1995).

A Csomád fő geomorfológiai egységeit a kúp vagy csonkakúp alakú lávadómok képezik. Míg az északi és délkeleti periférikus részeken a lávakúpok elkülönülve jelennek meg, a Csomád központi részén ezek egybekötődnek vagy egymásra épülnek, lávadóm-komplexumot képezve. Ez a komplexum tartalmazza az ikerkrátert, a fiatalabb Szent Annát, amelyben tó található és az idősebb Mohos krátert, amelyben tőzezláp található. Egy kúp kivételével (Hegyes-tető) a Csomád dómjait amfibol és biotit tartalmú, gyakran piroxénes, dácit lávák építik fel (Karátson et al., 2022). A Csomádot felépítő dácitok nagyobb része tömör lávakőzetek formájában szilárdult meg, helyenként jellemző a felfújó, likacsos szerkezet, egészen a horzsakő típusú, szivacsos, könnyű, vízen úszó típusokig. A dácit alapanyagú kőzetek másik megjelenési formája a piroklasztit, amely a kisebb-nagyobb, néha mázsás súlyú vulkáni bombáktól a diónyi lappili felhalmozódásokon át a nagy mennyiségű vulkáni homok, vulkáni hamu és vulkáni por méretű törmelékekig nagy felületeket és vastag felhalmozódásokat alkot a hegység lejtőin és a hegylábi felszíneken (Kristó, 1995). A Csomád egy gyakori típusú andezit-dácit lávakúp komplexum, amely váltakozó kiömléses és robbanásos aktivitást is mutatott a története során. A robbanásos fázisok erősebb, szubplíniuszi típusú kitöréseket is tartalmaztak, amelyek erősebben szétszóródott tefrát produkáltak. A Csomád dómjainak morfometriai analízise ezek korát kevesebb mint 100.000 évesre datálja, ezt a cirkónium alapú radiometrikus kronológiai mérések eredményei nagyjából alátámasztják, amelyek a vulkáni aktivitást ~200/250–30.000 éves intervallumra és a legtöbb lávadóm esetében ~150–100.000 éves korúra értékelik (Karátson et al., 2013). A

Csomád legutolsó, a Szent Anna kráterhez köthető kitörését a piroklasztikus lerakódásokban található faszén részecskék radiokarbonos kormeghatározása (^{14}C AMS) alapján 29.500 évesre datálják, amelyet egy 10.000 éves csendes periódus előzött meg, ugyanakkor a Szent Anna kráter kialakulása legalább két robbanásos kitöréshez köthető (Harangi et al., 2010). Míg a vastag vulkanikus–üledékes szukcesszió által feltöltött, majd egy 10 m vastagságú tőzegréteggel bevont Mohos kráter kitöréseinek története még nem tisztázott, a Szent Anna-tó tavi üledékének felső ~11 méteres rétege alapján bizonyítható, hogy ez a kráter már 26.000 éve létezett (Karátson et al., 2013).

A kráter alakja többé-kevésbé szabályos tölcsér, peremei közt mérhető legnagyobb átmérő 1743 m, átlagos átmérője 1600 m körül van. A legmagasabb pontja a Nagy-Csomád (1301 m), amely több mint 350 méterrel emelkedik a Szent Anna-tó szintje fölé, legalacsonyabb pontja a déli peremen található, 1060 m tengerszint feletti magassággal. A kráter belső lejtőin a lejtőszög átlagértéke 20° .

A Ny-i és ÉNy-i kráterfalat kemény lávaközetek alkotják, meredekebb és a tóhoz viszonyított relatív magassága is nagyobb, 127–350 m a szintkülönbség. Ezen az oldalon periglaciális eredetű lejtőtörmelék, köfolyások és a lejtés irányában meredek vízlevezető csatornák szeldek a felszínt. A D-i és K-i oldal relatív magassága kisebb és a lejtés is kisebb. D-en kevésbé tagolt, árkolt, K-i oldalán több vízlevezető árka van (Kristó, 1995).

2.1.3. Klíma

A vizsgált terület mérsékelt kontinentális éghajlatú, atlantikus (óceáni) hatásokkal, amelyek az egész év folyamán mérsékelt tengeri légtömegek advekcója következtében a nyári, május-júniusi csapadékmaximumokat, télen az északnyugati hideg légtömegek, illetve délnyugati meleg légtömegek beáramlásait okozzák (Badea et al., 1983). A Köppen-Geiger féle éghajlat-osztályozás szerint a Dfb és a Dfc kontinentális osztályok határán található, állandóan csapadékos, hosszú, hideg telekkel és nem túl meleg nyarakkal jellemezhető éghajlata van (Beck et al., 2018).

A Carpatclim (Carpatclim, 2010) adatbázis 1961–2010 közötti 50 éves időszakra számított 10×10 km felbontású meteorológiai adatsorainak legközelebbi, hasonló tengerszint feletti magasságban elhelyezkedő adatpontja szerint (k.h. 25.9° , é.sz. 46.0° , 1093 m tengerszint feletti magasság) a leghidegebb hónap (január) átlaghőmérséklete $-6,1^\circ\text{C}$, a legmelegebb hónap (július) átlaghőmérséklete 15°C körül alakul. A sokéves átlaghőmérséklet $5,0^\circ\text{C}$, a csapadékösszeg 593 mm, a legcsapadékosabb hónap a július, átlagosan 92 mm csapadékkal, a legszárazabb

hónap a november, 25 mm átlagos csapadékmennyiséggel. A napi csapadékmaximumok júliusra esnek, a többéves átlagérték 24 mm. A felhőborítottság sokéves átlaga 62,1%, a legnagyobb decemberben, 68,3%, a legkisebb értéke augusztusban van, 57,8%. A relatív páratartalom átlagértéke 85,2%, a legmagasabb értéke 90,3% december folyamán, legalacsonyabb értéke június hónap folyamán van, 81,6%. A potenciális evapotranszpiráció sokéves átlagértéke 513 mm, legmagasabb értéke július folyamán van, ez átlagosan 107 mm, a téli hónapok folyamán közelít a nullához. A potenciális evapotranszpiráció csapadékhoz viszonyított értéke alapján deficités a május–szeptember időszak, a legnagyobb potenciális hiány augusztusra esik (-20 mm). A De Martonne ariditási index (Păltineanu et al., 2007) sokéves átlaga 39,7 (nedves klíma). A fagyos napok átlagos száma ($t_{\min} < 0^{\circ}\text{C}$) 175, a nyári napok átlagos száma ($t_{\max} > 25^{\circ}\text{C}$) 10, a vegetációs időszak átlagos hossza 191 nap. Az átlagos szélesség 2,3 m/s.

Az előzőekben a Carpatclim (Carpatclim, 2010) adatbázis alapján felsorolt meteorológiai jellemzők részletes kiértékelése alapján elmondható, hogy az 50 évet átfogó adatsor értékeire fektetett regressziós egyenesek alapján az éves értékek emelkedő tendenciáit mutatják az átlaghőmérséklet, csapadékösszeg, páratartalom, potenciális evapotranszpiráció, felhőborítottság, vegetációs időszak hossza, nyári napok hossza, napi csapadékmaximumok esetében és csökkenő tendencia jellemzi a szélesség, fagyos napok száma és a De Martonne ariditási index esetében. Ez utóbbi index esetében egy egységnyi csökkenés látható az 1961–2010 időszak alatt, ami a klíma lassú szárazabbá válását mutatja.

A fentiekben bemutatott 1961–2010 időszak Carpatclim (Carpatclim, 2010) adatbázisának adatsorait összehasonlítva a Románia klimatológiai atlaszának (Stoenescu et al., 1966) az 1896–1955 időszak méréseire alapozó átlagértékeivel (átlaghőmérséklet $4,5^{\circ}\text{C}$, felhőborítottság 61%, evapotranszpiráció 495 mm, csapadékösszeg 800 mm, De Martonne ariditási index 55,1) is azt lehet következtetni, hogy a klíma egyre melegebbé és szárazabbá válik. Tekintettel arra a tényre, hogy a bemutatott klimatológiai adatok mindkét forrás (Stoenescu et al. 1966, Carpatclim, 2010) esetében a kutatási területre interpolációk révén számított értékek, amelyek az alkalmazott módszertan tekintetében is eltérőek, feltételezhető, hogy az összehasonlíthatóság tekintetében valamilyen mértékű hibával mindenképp kell számolni, azonban ennek mértéke nem lehet olyan nagyságrendű, hogy a klíma melegedésének és szárazabbá válásának trendjét ne lehessen egyértelműen megállapítani.

A Carpatclim adatbázis alapján végzett elemzések eredményei alapján Cheval és társai (Cheval et al., 2014) a kutatási területre vonatkozóan 10%-os szignifikanciaszinten az 1961–2010 időszakban szignifikáns változási trendeket mutattak ki a havi maximális hőmérsékletek

növekedésben a május–augusztus időszakra, a szélsébség csökkenésében az április és május hónapokra, a felhőborítottság növekedésében szeptember és október hónapokra, a napsütéses órák számának növekedésében február–március, a globális sugárzás növekedésében február és május, valamint csökkenésében szeptember és október hónapokban. Ugyancsak szignifikáns, 5%-ot meghaladó növekedést mutattak ki a relatív páratartalom esetében január, február, szeptember, október, november és december folyamán és szignifikáns növekedést a párányomás esetében január, július, augusztus és október hónapokra. Az éves csapadékösszeg esetében nem volt kimutatható szignifikáns változási trend. A hóréteg vastagságának tekintetében szignifikáns, 5%-ot meghaladó csökkenés kimutatható a január, február és március hónapok esetében.

2.1.4. Talaj

A kráterbelső fő talajtípusa a disztrikus andoszol, ami a „distic andosol” típusnak felel meg a 2012-es Román Talajosztályozási Rendszerben (SRTS-2012) (Florea et al., 2012) és a „dystric andosol” talajtípusnak felel meg a WRB 2014 (FAO, 2015) rendszerben. A talajszelvény az Au-AC-C szintekből (Au: A umbrikus humusz akkumulációs szint 0-20 cm, AC: átmeneti szint 20 és 50 cm között, C: alapkőzet). Az Au és A/C szintek homok, vályogos homok fizikai félelőséggel jellemezhetők, 5% körüli humusztartalommal, pH 4.1, Munsell-skála szerinti színe 10YR 2/1 az Au szintben, 10YR 3/4 az A/C szintben. A váztartalom meghaladja az 5%-ot az AU szintben, a homok aránya 93%, a térfogattömeg $0,6 \text{ g/cm}^3$. (Szmolka & Frank 2022).

Az andoszolok esetében az A szintet követő átmeneti AC, AR vagy Bv szint követi, amelyik andikus (an) tulajdonságokkal rendelkezik a szelvény első 25 centiméterében és legalább 30 cm szélességben. A litikus altípus esetben az andikus tulajdonságok a talaj mélységének több, mint felében meg kell jelenjenek, rendelkezhetnek organikus O szinttel (Florea et al., 2012).

Az andoszolok talajképző kőzetét a kőzetüvegben gazdag vulkáni piroklasztitok képezik, vulkáni tufán, láván, törmeléken, hamun, ár- és lahar üledékeken alakulnak ki. Kialakulásukat főként az anyakőzet befolyásolja, de a klíma is fontos szerepet játszik, főleg nedves körülmények között fordulnak elő. A finomszemű vulkáni anyag gyorsabb mállása bőségesebb tápanyagellátást biztosít ezeknek a talajoknak (Madarász, 2005). A talajképződés folyamatát jellemzik a mállás során kialakuló amorf allofán típusú anyagok, valamint alumínium- és vashidroxid organo-minerális komplexek. Az amorf anyagoknak a szervesanyag általi komplexálása következtében ezek kristályosodása és ezáltal az agyagásványok képződése lelassul. A humusz-allofán komplexek képződése mellett a talajképződés a kilúgzás és a savanyodás, valamint a szelvényben a humusz felhalmozódásának irányába halad, a bázistelítettség alacsony.

Általában luc, luc-bükk és helyenként elegendően bükk állományok alatt alakultak ki, rendszerint termékeny talajok, a lucosok esetében magas, a bükkösök számára közepes termékenységgűek. Ezeken a talajokon a széldöntések gyakoriak a talajok kis ($< 0,8 \text{ g/cm}^3$) térfogattömegének következtében (Târziu, 1997).

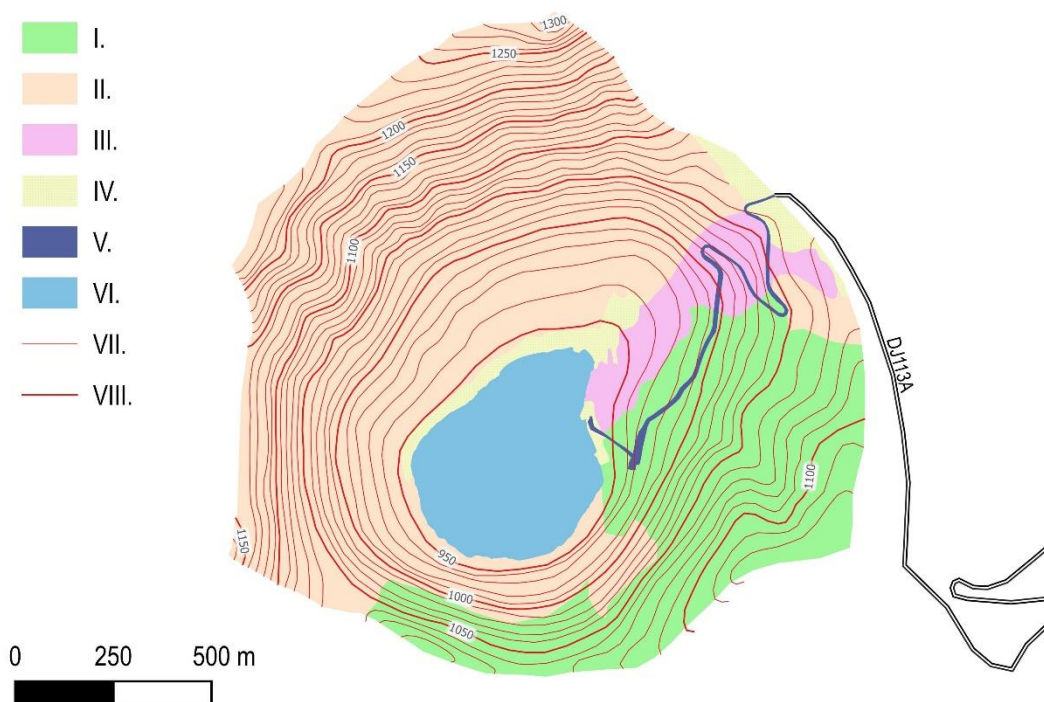
2.1.5. Növényzet

2.1.5.1. A jelenlegi növényzet

A Szent Anna kráterpereme által körbezárt terület 202,5 hektár, amelynek a tó 9,3%-át képezi, a vízállástól függően 18,9 hektár körül ingadozó területével. A tó vízgyűjtőterületét a 20°-os átlagos dőlésszögű (97,4 ha 20° alatti és 86,2 ha 20° feletti lejtéssel) belső kráterlejtő képezi (183,6 ha), ennek nagy részét, 176,1 hektárt erdők borítanak. A 95,9%-os erdőborítás mellett a vízgyűjtő 3%-át gyepek teszik ki, 5,5 hektáros összterülettel, amelyből 3 hektár található a tóparton és 2,5 hektár a kráterperem közelében. A fennmaradó területet a tó ÉK-i szélén található ingóláp (0,3 ha) tó körüli ösvények (0,6 ha) és a kráterperemet a tóval összekötő műút (1,5 ha), valamint a kráterperemen található nem burkolt utak, a parkolók és az épületek képezik.

A kráter belső lejtőin található erdőket egykorú idős bükkösök (*Fagus sylvatica*), vegyeskorú bükkösök és ezek lucfenyővel (*Picea abies*) és jegenyefenyővel (*Abies alba*) képzett elegyei, középkorú lucosok és fiatal, valamint középkorú bükk–luc elegyek alkotják. Az idősebb állományok esetében a felsorolt fafajokon kívül más elegyfajok nem, vagy csak elvétve fordulnak elő az állományban, a fiatal és középkorú állományok esetében változó elegyarányban bibircses nyír (*Betula pendula*), rezgő nyár (*Populus tremula*) és kecskefűz (*Salix caprea*) is megjelennek a fafajösszetételben.

A növényzeti övek besorolása szempontjából az erdők a magashegységi bükk-fenyő elegyek és hegyvidéki bükkösök öveibe sorolhatók. Az erdei termőhelyek termőképessége szempontjából magas és közepes minőségű termőhelyek találhatóak (Târziu, 1997, Vodă és Raclariu, 2017) a kráterben (magashegységi fenyőelegyes bükkösök közepes és magas termőképességű, hegyvidéki bükkösök közepes termőképességű termőhelyei). A romániai erdei ökoszisztéma osztályozás (Doniță et al., 1990) szerinti, a kutatási területre jellemző, jelentős területarányt, a hatályos üzemterv szerint (Vodă és Raclariu, 2017) 50 hektárt borító természetes erdei ökoszisztéma típusa a „3316-Bükkös Oxalis-Dentaria-Asperula flórával” (Doniță et al., 1990), amely a Natura 2000 előhely-osztályozás szerint „91V0 Dák bükkös erdők (*Symphyto–Fagion*)” típusnak (Doniță et al., 2005) felel meg (2. ábra).



2. ábra. A Szent Anna-tó belső kráterlejtőjén előforduló ökoszisztéma-típusok a hatályos erdészeti üzemterv szerint (Vodă és Raclariu, 2017); (Jelmagyarázat: I. 3316-Bükkös *Oxalis-Dentaria-Asperula* flórával, II. 3426-Luc-bükk elegy *Oxalis-Dentaria-Asperula* flórával, III. 1226-*Lucos Oxalis-Dentaria-Asperula* flórával, IV. gyepek, V. aszfalozott műút és parkoló, VI. Szent Anna-tó, VII. szintvonal, VIII. főszintvonal)

A továbbiakban a típust a romániai erdei ökoszisztéma osztályozás szerinti leírás alapján (Doniță et al., 1990) mutatom be. Ebbe az ökoszisztéma-típusba magas és közepes termőképességű bükkösök tartoznak, a Kárpátokban mindenhol elterjedt típusról van szó, a Keleti Kárpátok esetében ennek déli részén, a nyugati oldalon elterjedt 700-1350 m tengerszint feletti magasságban, különböző dőlésszögű és kitettséggű lejtőkön, hegyhátakon, platókon.

A faállomány uralkodó szintjében a bükk a főfafaj, ritkábban hegyi juhar (*Acer pseudoplatanus*), jegenyefenyő és lucfenyő részvételével. A típust teljes záródású (80-100%) állományok jellemzik, magas vagy közepes fatermőképességgel. A bükk 100 éves korban 30-34 méteres magasságot érhet el, 34-40 centiméteres átlagátmérővel és 600-470 m³/ha fatérfogattal 80% záródás mellett.

A cserjeszint általában hiányzik, elvéve fürtös bodza (*Sambucus racemosa*), fekete bodza (*Sambucus nigra*), farkasboroszlán (*Daphne mezereum*), málna, mogyoró fordulhat elő.

A lágyszárú szintben a tavaszi aspektus fejlettebb. A termékeny, normális humifikációt jelző (Beldie és Chiriță, 1954) növények, mint a sárga árvacsalán (*Lamium galeobdolon*), borzas repkény (*Glechoma hirsuta*), szagos müge (*Asperula odorata*), ikrás fogasír (*Cardamine*

glanduligera), madársóska (*Oxalis acetosella*), vörös tüdőfű (*Pulmonaria rubra*), borzas szeder (*Rubus hirtus*) és az üde-félnedves vízgazdálkodási fokot tükröző (Beldie és Chiriță, 1954, Majer, 1968) fajok, mint a madársóska, ikrás fogasír, erdei szélfű (*Mercurialis perennis*) túlsúlya jellemző.

A Szent Anna-tó bükköseiben a lágyszárú flóra részét képezik az erdei kutyatej (*Euphorbia amygdaloides*), berki szellőrózsa (*Anemone nemorosa*), szagos müge, farkasszőlő (*Paris quadrifolia*), szívlevelű nadálytő (*Symphytum cordatum*), odvas keltike (*Corydalis cava*), vörös tüdőfű, nagy csalán (*Urtica dioica*), erdei nefelejcs (*Myosotis sylvatica*), erdei madársóska, málna (*Rubus idaeus*), borzas szeder, erdei csillaghúr (*Stellaria nemorum*), ikrás fogasír, hagymás fogasír (*Cardamine bulbifera*).

Az előbb bemutatott bükkös ökoszisztéma mellett a kráter belső lejtőjén a „3426-Luc-bükk elegy Oxalis-Dentaria-Asperula flórával” (Piceeto-Fagetum oxalidosum) képviseli a legnagyobb területarányú ökoszisztémát, 116 hektáron terül el a hatályos üzemterv adatai szerint (Vodă és Raclariu, 2017). A típust a romániai erdei ökoszisztéma osztályozás szerinti leírás alapján mutatom be a továbbiakban (Doniță et al., 1990). Magas termőképességű, általában a luc dominanciájával jellemezhető, a Keleti Kárpátokban szigetszerű, inkább a vulkanikus hegysekben előforduló típus. Általában 1250-1400 m tengerszint feletti magasságban, különböző kitettségű és dőlésszögű lejtőkön található meg.

A faállományban az összetétel változó, de általában a luc túlsúlya jellemzi (60-80%), a bükk (20-40%) mellett az állományban elszórtan a jegenyefenyő és a hegyi juhar jelenhet meg. Teljes záródású (80-90%) állományok jellemzik az ökoszisztémát, magas fatermőképességű altípusában a luc 100 éves korban 31–36 méteres átlagmagasságot érhet el 40–43 cm átlagátmérővel, a bükk 26–30 m átlagmagasságot és 25 -34 centiméteres átlagátmérőt érhet el, az állomány 750–1000 m³/ha fatérfogatú 80%-os záródás mellett. A közepes termőképességű altípus esetében 100 éves korban a luc 25-32 méteres átlagmagasságot, 32 -40 cm átlagátmérőt, a bükk 22 -26 m átlagmagasságot, 24 -29 centiméteres átlagátmérőt képes elérni, egyenes, hengeres, jól feltisztult törzsek jellemzik, főleg a luc esetében.

A cserjeszint gyengén fejlett, a lágyszárú szint általában jól fejlett, madársóska, szagos müge alkotja, kisebb mértékben bükkász (*Carex pilosa*), erdei perjeszittyó (*Luzula sylvatica*), erdei számoça (*Fragaria vesca*), borzas szeder, nehézszagú gólyaorr, erdei szélfű, vörös tüdőfű, foltos árvacsalán (*Lamium maculatum*), kakicsvirág (*Mycelis muralis*) jelenhet meg.

A luc elegyedésű bükkösökben a Szent Anna-tó belső kráterlejtőin madársóska, borzas szeder, vörös tüdőfű, erdei szamóca, málna, borzas repkény (*Glechoma hirsuta*) képezik a lágyszárú szintet, amely jól reprezentált.

A Szent Anna-tó kráterében előforduló harmadik jellemző erdei ökoszisztéma, 10 hektáros területen, a „1226-Lucos Oxalis-Dentaria-Asperula flórával” (Doniță et al., 1990), amely a Natura 2000 előhely-osztályozás szerint „9410 Acidofil hegyvidéki és alhavasi lucos (Vaccinio-Piceetea)” típusnak (Doniță et al., 2005) felel meg. A típust a romániai erdei ökoszisztéma osztályozás szerinti leírás alapján mutatom be a továbbiakban (Doniță et al., 1990). Magas és közepes fatermőképességű lucosokat foglal magában, ez az ökoszisztéma-típus legnagyobb kiterjedéssel a Keleti Kárpátokban rendelkezik, a lucos klímazóna alsó és középső részének jellemző típusa. 1000-1300 méteres tengerszint feletti magasságon, az enyhétől az erőteljes lejtésű, különböző kitettségű lejtőkön található.

A faállományt általában elegyetlen lucosok alkotják, elszórtan jegenyefenyő, bükk, hegyi juhar, hegyi szil (*Ulmus glabra*), bibircses nyír jelenhet meg. A típust teljes záródású (80-100%) állományok jellemzik, magas vagy közepes fatermőképességgel. A luc 100 éves korban 32-34 méteres magassággal és 40-45 centiméteres átlagátmérővel rendelkezhet, 800-660 m³/ha fatérfogattal, és 88-91%-os szerfa-aránnyal.

A cserjeszint jellemzően hiányzik, az állományszegélyben, bolygatásokban fürtös bodza, márdárberkenye (*Sorbus aucuparia*), szillelevelű gyöngyvessző (*Spiraea ulmifolia*), havasi ribiszke (*Ribes alpinum*), farkasboroszlán, málna jelenhet meg.

A lágyszárú szint egyenetlen, foltszerű, madársóska által dominált. Jellemző fajok az ikrás fogasír, vörös tüdőfű, szagos müge. Gyakoriak a páfrányfélék, mint az erdei hölgypáfrány (*Athyrium filix-femina*), erdei pajzsika. Előfordulhat az erdélyi hölgyalm (Hieracium transsylvanicum), terebélyes harangvirág (*Campanula abietina*) és olyan mull-flóra fajok, mint a sárga árvacsalán, erdei kutyatej, borzas szeder, erdei szélfű, nehézszagú gólyaorr, erdei kölesfű (*Milium effusum*) stb.

A Szent Anna-tó kráterében a lucosok lágyszárú flórájában a madársóska mellett nehézszagú gólyaorr, málna, vörös tüdőfű, szívlevelű nadálytő, szagos müge, hagymás fogasír, erdei pajzsika, helyenként a fekete áfonya (*Vaccinium myrtillus*) is előfordul.

A Szent Anna-tó kráterében található gyepek, a jelentős antropogén hatás következtében, jellegtelenként meghatározható életközösségeket képeznek. Fő fajai a vörös csenkesz (*Festuca rubra*), réti perje (*Poa pratensis*), egynyári perje (*Poa annua*), csomós ebír (*Dactylis*

glomerata) (Szmolka és Frank, 2022a). A terület turisztikai jelentősége miatt ezek a gyepék jelentős taposásnak vannak kitéve, borításuk a terület nagy részén folytonos, de a nagyobb turisztikai nyomásnak kitéve, 10 -15 méteres szélességű tóparti sávban sok helyen erodáltak, a borítás részleges.

A tó északkeleti részén kialakult ingóláp szövetét csőrös sás (*Carex rostrata*) és gyapjasmagvú sás (*Carex lasiocarpa*) alkotják, amelyen tőzegmoha fajok (*Sphagnum spp.*) és fürtös lizinka (*Lysimachia thyrsoiflora*) tenyészik. Ezek között szürkés sás (*Carex canescens*), töviskés sás (*Carex echinata*) és széleslevelű gyapjúsás (*Eriophorum latifolium*) fajok is előfordulnak, külső szélein, ahol a tőzeg már humuszosabbá válik csomós szittyó (*Juncus conglomeratus*), vízi pesztréce (*Lycopus europaeus*), kúszó boglárka (*Ranunculus repens*) és réti perje (*Poa pratensis*) található (Nyárádi, 1929). A tőzegmohák tekintetében, Boros Ádám szerint, a *Sphagnum magellanicum*, *Sphagnum subsecundum*, *Sphagnum recurvum*, *Sphagnum girgensohnii* fajok találhatóak meg, a mohák közül a *Pohlia nutans* és a *Polytrichum commune* fajok találhatóak meg, a tó lápjában a kerekelevelű harmatfüvet (*Drosera rotundifolia*) is megemlíti (Boros, 1943).

2.1.5.2. A növényzet múltbeli alakulása

A belső kráterfal vegetációjáról, ennek időbeni alakulásáról pontos képet kaphatunk a történeti feljegyzések, tudományos kutatások alapján, de a tó turisztikai vonzerejének köszönhetően az utóbbi 100 évben jelentős fényképanyag is rendelkezésre áll.

A tó vegetációjának időbeli alakulásának sorrendjét követve elsőként említendő Magyarai Enikőnek és munkatársainak kutatása (Magyarai et al., 2006), amely a tó és környezetének változásait tárja fel a holocénben. A szerzők a tó aljzatába fűrt fűrásszelvényből vett minták pollen, növényi makrofosszilia, szilíciumvázás alga és nyomelem-vizsgálatai segítségével rekonstruálták a holocén környezetváltozásokat és a tó vízszintjének ingadozásait. A földi vegetáció fejlődését a pollendarányok és a makrofosszilia adatok alapján rekonstruálták. Az időszakokat cal yr BP időben adták meg, ahol 0 cal yr BP az 1950-es éveknek felel meg, ezért az adott szakirodalmi forrás feldolgozása során a következőkben a megadott időszakok cal yr BP-ben értendők.

A 9830–8800 évvel ezelőtti időszakban a kráterbelső oldalait szil (*Ulmus sp.*) és magaskőrös (*Fraxinus excelsior*) állományok borították, tölgyek (*Quercus sp.*), hársak (*Tilia sp.*) és mogyoró (*Corylus sp.*) jelenlétével. A lucfenyő a tó közvetlen környezetében, a tóparton nőtt, juharral (*Acer sp.*) együtt. Az időszak vége felé a mogyoró elterjedése nőtt az erdőkben és a 8800–7050 évvel ezelőtti időszakot a faj térhódítása jellemzi, mogyoró dominálta erdőtársulások

alakultak ki. A lucfenyő tóparti jelenléte és esetleges terjedése is igazolható ebben az időszakban. A luc a kráterben ebben az időszakban létrejött tőzeglápon is tenyészhetett. A 7500–5500 évvel ezelőtti időszakban a gyertyán (*Carpinus betulus*) térhódítása mutatható ki. A mezofil lombhullató fajok (kőris, hárs, tölgy és szil) aránya fokozatosan növekedett. Az 5250–3300 évvel ezelőtti időszakban a gyertyán magas pollen-koncentrációja egy teljes gyertyán erdőöv kialakulását mutatják a kráterben. A lucfenyő jelenléte a tóparton folyamatos volt, feltételezhető, hogy a lucfenyő elkezdett terjeszkedni kifelé a kráteroldalon és valószínűleg luc–gyertyán elegy jött létre ebben az időben. 4700–4200 évvel ezelőtt több bolygatást jelző lágyszárú faj megjelenése volt kimutatható (pl. *Rumex acetosella/acetosa*, *Plantago major/media*). A nyír 4200 évvel ezelőtti megjelenése az erdőbolygatást követő másodlagos szukcessziót bizonyítja, amelyek alacsony mértékű emberi hatás jelenlétére mutatnak a tó körül. A bükk 3700 évvel ezelőtt jelent meg a kráterben. A 3000–2200 évvel ezelőtti időszakban a tiszafa (*Taxus sp.*) is megjelent és a bükk terjedésével együtt a klíma kontinentalitásának csökkenését és enyhe telek kialakulását mutatja. A bükk a tópartig terjedt a 2700 évvel ezelőtti időszakban, a lucot vélhetőleg részben felváltva a tóparton. Az első jól elhatárolható erdőirtás a pollendiagramon 1100 évvel ezelőtt jelenik meg. Az erdőirtás a kráterbelső bükk, gyertyán és tölgy állományaira volt hatással, a nyír, a boróka (*Juniperus sp.*) és a jegenyefenyő (*Abies alba*) megjelenése volt kimutatható a lékekben, amelyet később a bükk követett. A tóparton a bükk eltűnt, a lucfenyő aránya megnőtt. A végső vegetációs fázisban (440–0 évvel ezelőtt) a lucfenyő és a bükk elterjedése jellemző. Az erdei flóra diverzitása is növekedett, főleg a cserjefajok esetében, a bodza (*Sambucus*), a boróka, a húsos som (*Cornus mas*), a kecskerágó jelenléte a folyamatos erdőbolygatást jelzi.

Magyari Enikő és munkatársai leírásának alapján pontos képet kaphatunk a vegetáció alakulásáról a kráterben, kiemelhető, hogy a lucfenyő tóparti megjelenését követően a tópart körüli lucos gyűrű, ha néha részlegesen visszaszorult is, de állandó összetevője volt kráterlejtő vegetációjának, ez képezte a tó és a kráter erdei közti átmenetet, határt.

Orbán Balázs a Szent Anna-tó kráterében már a napjainkban megfigyelhető fafajösszetételű és elhelyezkedésben is hasonló vegetációt ír le (Orbán, 1869). Az adott időszakban a kráter DNy-i belső oldalát sűrű bükkös borította, a lucos a tópart mentén helyezkedett el, az ÉNy-i oldalon a bükk-fenyő elegy a kráterperemig húzódik. Az ÉK-i oldalon a tisztás megtalálható. A tavat szegélyező fenyvest fiatalnak írja le, és a közötté mohás utat ír le a tó körül. Hankó Vilmos szerint a kráterbelső lejtőit bükkerdő borította, a tó partját pedig fenyők koszorúja övezi (Hankó, 1901).

Gelei József 1909-ben megjelent tanulmánya a tóparton fenyők jelenlétét írja le, a tó és körülbelül 10 m távolságra elhelyezkedő gyalogút között fiatal fákat, ezen kívül idős fákat ír le, és három korosztályt különít el, amelyek három gyűrűt képeznek a tó körül (Gelei, 1909). Ugyancsak a Gelei közleményében található fényképen látható, hogy az északkeleti kráterfalán az erdőborítás nem teljes, inkább fás legelő lehetett, csak a tavat szegélyező luc sáv található meg a kráterlejtő alján.

1929-ben a tó szélén található lucfenyők osztatlan gyűrűt képeznek, de a tó szélétől legalább néhány méter távolságra helyezkednek el, a kráteroldalakon lucfenyő, boróka, erdei fenyő (*Pinus sylvestris*) és ritkásan előforduló bükk található, a nyugati oldalon, északnyugat felé haladva egyre több luc elegyedik a bükk közé és az északi oldalon a gerincig a luc dominál az összetételben, ezt 1929-ben nagyobb részét kivágták. A déli oldalon a gerincen is csak bükk van (Nyárádi, 1929). Magyarai és munkatársai feltételezik, hogy a Nyárádi által leírt állapot kialakulását egy a 20. század elején pusztító kiterjedt erdőtűz idézte elő (Magyarai et al., 2006), az általam ismert korabeli fényképek, képeslapok alapján ennek helye nem azonosítható.

Boros Ádám szerint a tó körül bükkös van, csak a partján és néhány kisebb folton van lucfenyő, ami a helyi mikroklimatikus viszonyokkal, a ködképződéssel függhet össze (Boros, 1943).

Vofkori László tesz említést egy 1946-os erdőtűzről (Vofkori, 2004). Korabeli fényképek alapján is jól látható, hogy a kráter nyugati és északi lejtőinek erdei váltak a tűz áldozatává.

Az elmúlt időszakban hatályos üzemterv (Vodă és Raclariu, 2017) vonatkozó adatai alapján a Szent Anna-tó kráterbelső erdőiről átfogó leírást kaphatunk, a tó körüli erdők múltbeli gazdálkodásával kapcsolatos és az üzemtervezésekre vonatkozó információk is fellelhetők a tanulmányban. Az erdőgazdálkodás üzemtervek vagy vázlatos kitermelési szabályok alapján történt 1889-től kezdve, úgy az Osztrák-Magyar Monarchia idején, mint azután, az 1948-ban bekövetkezett államosításig. 1948-ban az erdők a román állam tulajdonába kerültek az 1948-as alkotmány 6. cikkelye alapján. Az új jogi és adminisztratív viszonyok közt 1951-ben készült az első üzemterv, a kutatási terület erdői a Csíkszentmártoni Állami Erdőgazdálkodás kezelésébe kerültek. Ennek és az ezt követő üzemtervek alapját az erdők hosszútávú folyamatos termelékenység-növelésének elve képezte.

Az üzemtervi nyilvántartás szerint az erdők elsődleges rendeltetése mindvégig véderdő volt, a Szent Anna-tó megőrzése érdekében, ezért a tervezett beavatkozások egészségügyi és konzerválási vágások voltak minden üzemtervezési ciklusban. Az erdők összességét tekintve a kor szerkezet nem volt kiegyensúlyozott, az erdők fafajösszetétele az optimálistól eltérő volt a

régebbi üzemtervezési ciklusokban, a bibircses nyír, a rezgőnyár és a kecskefűz magas elegyaránya volt jellemző.



3. ábra. A Szent Anna-tó

2.1.6. Hidrológia

2.1.6.1. Batimetria

A Szent Anna-tó fennmaradásával kapcsolatos egyik sarkalatos kérdés a batimetria alakulása. A holocén hidrológiai változásait Magyarai Enikő és munkatársai azonosítják (Magyarai et al., 2009). A szerzők szerint a 9300–9000 cal yr BP időszakban sekély, nyílt vízfelületű oligomezotróf tó volt található a kráterben, körben tőzegmoha-láppal. Ezt követően a 9000–7400 cal yr BP időszakban a tőzegláp volt itt tőzsemekkel, majd a 7400–5350 cal yr BP időszakban a vízmélység növekedése, *Warnstorfia fluitans*, közönséges nád (*Phragmites australis*), keskenylevelű gyékény (*Typha angustifolia*) és sásfajok dominálta láp alakult ki tőzsemekkel, időszakos vízmélység csökkenések jellemezték, amelyet gyapjúsás (*Eriophorum*) jelez. Az 5350–3400 cal yr BP időszakot oligo- és mezotróf sekély tó jellemzi *Sphagnum compactum* -mal és lebegő vízinövényfajokkal, a tőzegély lágját közönséges nád, keskenylevelű gyékény és *Carex* spp. dominálták. A vízmélység fokozatosan növekedett 4300 cal yr BP időszakkal kezdődően. A 3400–1000 cal yr BP időszakban a vízmélység és a térfogat jelentősen növekedett, oligotróf nyílt vízfelületű tó alakult ki, elszórt makrofita vegetációval. A *Scenedesmus* zöldalga jelenléte időszakos tápanyagfeldúsulást jelez, a *Botryococcus pila* virágzásai időszakos vízszintcsökkenéseket vagy humuszsavak bemosódását tanúsítják ebben az időszakban. Az 1000–760 cal yr

BP időszakot a vízszint csökkenése, eutrofizáció és a tóparti *Carex* és *Sphagnum* fajok alkotta ingóláp kialakulása, időszakosan magas tápanyagigényű vizinövény-fajok megjelenése jellemezte.

Az elmúlt másfél évszázad során a tó medrének jellemzőit számos kutató vizsgálta. A XIX. századból említések vannak a tó mélységével kapcsolatban, de dokumentált felmérések csak a XX. század elejétől történtek.

Orbán Balázs a tó legnagyobb mélységét 40 lábnak (12,67 m) írta le (Orbán, 1869), Hankó Vilmos a tó területét 1800 méternek adja meg (Hankó, 1901). Gelei József 8,3 méteres maximális mélységet mért, a tó területét 1749 méternek, legnagyobb átmérőjét 680 méternek, erre merőleges kis tengelyét 470 méternek, területét 21,39 hektárnak, víztartalmát 862 483 m³-nek írta le (Gelei, 1909). Pişota és Năstase 1957-ben végeztek batimetriai méréseket. Arra a következtetésre jutottak, hogy a morfometriai jellemzők általánosan csökkentek, az északi és a nyugati part „előrehaladt”, a tó formaindex megváltozott, de az átlagos mélység nem. Az általuk leírt legnagyobb mélység 7 m, a terület 1737 m, a terület 19,53 ha, a köbtartalom 78 636 m³, a tó nagy tengelye 680 m, kis tengelye 464 m (Pişota és Năstase, 1957). Jánosi Csaba szerint 1971-ben a legnagyobb mélység 7,2 méter, a terület 1712 méter, a tó felszínének területe 19,38 hektár, a víztartalom 724 920 m³ (Jánosi és Péter, 1995). Pál Zoltán 1999 februárjában 6,3 m, novemberben 5,9 m maximális mélységet mért (Pál, 2000), majd 2000 novemberében ultrahang-alapú méréssel 4,85 métert (Pál, 2001), de ez utóbbi mérésnek, a klasszikus, súly-leengedésen alapuló módszerrel való összehasonlíthatósága megkérdőjelezhető. Pándi elemzésében a tó területének 10%-os, a szélességének 4%-os csökkenését írja le (Pandi, 2008). 2018-ban Mihály István 7,2 méteres vízszintet mért, az összehasonlíthatóság érdekében a Gelei József által ismertetett módszertant alkalmazva, a terület 19,04 ha volt. A tó mélységének csökkenését 1,5 méteresnek értékeli az 1909-es mérésektől eltelt idő alatt, és ezt részben a feltöltődéssel, részben a tó vízszintjének csökkenésével magyarázza (Mihály, 2018). 2018-ban a tó víztérfogata 651 574 m³ körül ingadozott, ez alapján 24-25%-os víztérfogat-csökkenés történt az elmúlt egy évszázad során (Máthé et al., 2022). A bemutatott kutatások nagy hiányossága, hogy egy közös, kiindulási referenciaszint meghatározása nem történt meg, a vízmélységet mindig az aktuális vízfelszíntől mérték, ezért a vízszint csökkenése nem mérhető, a mélység csökkenése nem bontható feltöltődés és vízszint-csökkenés komponensekre. Az alkalmazott mérési módszerek, eszközök is eltérőek voltak, kivéve Gelei József (1909) és Mihály István (2018) méréseit. Jelenleg a tó területe 18,9 hektár körül ingadozik (Szmolka és Frank, 2022a).

A tó vízmérlegének fő tápláló komponensei Gâştescu és Driga szerint a csapadék (42,64%) és a felszíni hozzáfolyás (57,36%) amelyet a felszín alatti elfolyás (68,73%) és a párolgás (31,27%) egyenlít ki (Gâştescu és Driga, 1983). A tó nem rendelkezik állandó felszíni vízfolyásokkal, számottevő felszín alatti hozzáfolyás létezése nem volt bizonyítva, de ennek a komponensnek a létezése nem elvethető.

Begy és munkatársai ^{210}Po többlet (alfa spektrometria) és ^{210}Pb aktivitás koncentráció (gamma spektrometria) módszereit használva vizsgálták a tó üledék-rétegeinek a korát, ez alapján határozták meg a lineáris és tömeg-szedimentációs rátákat, mint a feltöltődés jelzőszámait a Szent Anna-tónál (Begy et al., 2011). A tömeg-szedimentációs ráta értékét $0,06 \pm 0,01$ és $0,032 \pm 0,05$ g/cm²év, átlagát $0,15 \pm 0,02$ g/cm²év-nek állapították meg, a meghatározott lineáris szedimentációs ráták sokkal magasabbak, $0,5 \pm 0,1$ és $7,9 \pm 0,7$ cm/év érték közti intervallumban helyezkedtek el, átlagosan $2,4 \pm 0,6$ cm/év értékkel. A szerzők ezeket a magas értékeket a főleg szerves eredetű összetétellel és a hosszú lebegési (szuszpenziós) idővel magyarázzák, amely az eutrofizáció folyamatának az indikátora, ugyanakkor felhívják a figyelmet az idősebb üledéknek a tó közepének irányába történő vándorlására, fókuszálódására is, ezeknek a folyamatoknak az eredményeképpen a tó tőzeglappá történő átalakulását valószínűsítik a következő, megközelítőleg 300 éves időszak alatt.

A tó vízszintjének a lassú csökkenését valószínűsíti Gelei József a XX. század elején, ezt azzal támasztja alá, hogy a tó körüli gyalogút és a tó közötti partrészen a fiatal fák három nemzedékét különíti el, az út mellett a legidősebb, a tó mellett a legfiatalabb fákat, amit a tó szintjének háromszori esésével magyaráz. A régi tópart szerinte a gyalogösvény helyén volt található, illetve egy akkor folyamatban levő visszahúzódásról ír, amit azzal magyaráz, hogy egy 1973-as állapothoz hasonlítva az északi parton nagyobb szabadon járható rész keletkezett és a legfiatalabb fenyők parti szegélyén alig tenyésző, kisárgult tőzegmohatelepek jelenlétét említi, amelyek akkor keletkezettek, amikor még a magasabb vízszint következtében megfelelő nedvességhez jutottak (Gelei, 1909). Megfigyelését alátámasztja Nyárádi megfigyelése is, aki azt feltételezi, hogy a tó vízállása azelőtt egy méterrel is magasabb volt, amit a tó szélétől néhány méterrel távolabb, az erdő alatt található méteres vastagságú „turfá” réteg jelenlétével magyaráz (Nyárádi, 1929). Helyenként a part lépcsőzetes emelkedése, elpusztult tőzegmoha „küszöbök” maradványai most is azonosíthatók az ÉNY-i partszakaszon, ezek a tó közelmúltbeli magasabb szintjét igazolják. Részben a vízszint-csökkenést bizonyítja a tó kerületének és területének a csökkenése az elmúlt évszázad során.

A kráter eróziójára és az ezzel együtt zajló szedimentációra is több utalás létezik. Gelei József a keleti kráterfal erózióját említi, ahol a tó partján a régi „sziklameder” van, mert az ide lerohanó vadvizek beseprik az üledéket a tóba, ugyanakkor a víz tisztaságával kapcsolatban azt a megjegyzést teszi, hogy a tóba iszap nem szállítódik, nincs ami felzavarja (Gelei, 1909).

Pál Zoltán (Pál, 2000) szerint az ÉK-i részen töltődik legintenzívebben a tó, itt található a kráterbelső legnagyobb eróziós árka, amely a legfőbb anyagszállítóként jelenik meg a kráterben. Ez a turistaáradatot kiszolgáló műút megépítésének következtében alakult ki, mert a tömeg nem követi a műút kanyargós vonalát, hanem ezek közt rövidítve egyenesen tart a tó irányába. Az állandóan igénybe vett ösvényen az aljnövényzet nem tud regenerálódni, így a gravitációsan mozgatott hordalékok könnyen a tóba jutnak, így nem véletlen, hogy a rövidítő ösvény tószéli végénél a legnagyobb területű a kolluviális lejtő és a legnagyobb területen hódít a tőzegmoha. Meglátása szerint anyagbehordás mindenütt történik, ha kisebb mértékben is, ezzel kapcsolatban az északi kráteroldalban kidőlt lucos rész területéről rövid idő alatt a tópartra lehordott talajrészecskéket, fenyőtűket említi, az anyagbehordással kapcsolatban az erdő és a tópart közt található gyepsávnak tulajdonít jelentős hordalékfelfogó, szűrő szerepet.

Az ÉK-i rész batimetriai térképek összehasonlítása alapján megállapított gyors feltöltődési folyamatát nem igazolják az alfa- és gamma-spektrometriai módszerekkel végzett vizsgálatok (Begy et al., 2011). Az eredmények itt kisebb szedimentációs rátát, de erős eutrofizációs folyamatot bizonyítanak, ugyanakkor a déli partszakaszon, ahol az erdő a tőszegélyig ér, és ahol előző kutatások kisebb változásokat mutattak ki, magas lineáris szedimentációs ráta értékek voltak mérhetőek. A keleti partszakasz magas szedimentációs rátával és ugyanakkor erős eutrofizációval jellemezhető. A 2001-ben publikált ultrahangon alapuló batimetriai mérések során feltérképezett iszapvastagság térkép a tó iszaprétegének legnagyobb vastagságát (> 400 cm) a tó DK-i részén tünteti fel (Pál, 2001). 2013-as mintavételezés során a fúrás a tavi üledékréteg alját 2100 cm mélységben érte el (a vízfelszíntől számítva), ez alatt horzsaköves rétegek váltakoznak homokos iszappal 2300 cm-ig, ami alatt durva horzsakő található (Magyari et al., 2014).

Az erdő a pusztuló biomasszájának szél általi behordása, illetve a kidőlő, tóba eső fák révén is szerepet játszik a tó feltöltődésében. Ezt jól tükrözi a meder alján található üledék felszínének szerkezete, amelyet már Gelei József is leírt. A tófenék a tóba behulló, szélről besepert, fenyő- és más levelek, rügpikkelyek, bedőlt és beúszott fenyőtörzsek szétmállott korhadékából áll, amely könnyen lebegő üledéket képez (Gelei, 1909).

Az erdő szerepét hangsúlyozzák ki a paleolimnológiai kutatások eredményei is. A vízmélység alakulásának rekonstrukciója során két jelentős mélységnövekedést írnak le, 5350 és 3300 cal

yr BP időszakokban, és mindkét esetben ez a vízmélység-növekedés egybeesik a kráter erdőállományának radikális fafajösszetételváltozásával, amely a luc irányából a gyertyán-luc dominancia és a luc-gyertyán dominancia irányából a bükk dominancia irányába zajlott le, ezért az valószínűsíthető, hogy a vízszintemelkedés folyamatát erősítette az állományok intercepciójának csökkenése. A lucosok bükkösökhöz mért sokkal nagyobb korona-intercepciója valamilyen mértékben felelős lehetett a korai holocén luc dominanciája mellett kialakult sekély vízmélységért és feltehetőleg csillapította a lehullott csapadékmennyiség fluktuációit is a jelentős mennyiségű (37%) intercepciójával. A hidrológiai változásokért elsődlegesen a makroklíma változásai felelősek, a hidrológiai rendszer csak pozitív visszacsatolással (pl. intercepció) reagált, felerősítve a külső kényszerítő tényezők hatásait (Magyari et al., 2009).

2.1.6.2. A tó vizének jellemzői

A tó vizének hőmérsékletét az évszakok változása során a meteorológiai tényezők, mint a léghőmérséklet, csapadék, párolgás befolyásolják. Máthé István szerint a jéggel borított december-március időszakban inverz hőrétegzettség jellemző, a vízhőmérséklet a fagypontra körülbelül a mélységgel növekedni kezd, majd 1 m mélység után 4°C a fenékreig. A tavaszi és a nyári hónapokban folyamatosan nő, júniusban-júliusban elérve a maximális értéket, a nyár folyamán direkt hőrétegzettség van, hőmérsékleti gradiens alakul ki, fent a legmelegebb (akár 26°C), a fenék közelében a leghidegebb a víz. A tó vize ősszel, a lehűlés során és tavasszal, az olvadást követően teljesen átkeveredik. A víz oldott sótartalommal arányos vezetőképessége nagyon alacsony, a 2012–2020 időszakra vetített sokéves átlag 16µS/cm körül alakult, a mélyebb fenéközeli vízrétegek vezetőképessége magasabb. A vezetőképesség alapján számolt sótartalom 0,01 -0,02g/l, a világ leglágyabb vizei közé tartozik (Máthé et al., 2022).

A tó vizének stabilizotóp-összetételének ($\delta^{18}\text{O}$, $\delta^2\text{H}$) a globális és helyi csapadékvízvonalakhoz történő összehasonlítása alapján a tó vize csapadékvíz-eredetű és felső rétegeit nagyban befolyásolta a párolgás, a tó sérülékeny lehet a klimatikus (hőmérséklet és csapadékmennyiség) változásokra (Kis és Palcsu, 2022).

A kémhatás tekintetében a Szent Anna-tó vize enyhén savas (5-6,7 pH), a vizsgált 2012–2020 időszakban, ugyanakkor a savasság határozott emelkedése látható, ami valószínűsíthetően a növekvő algapopuláció fotoszintézise következtében történő CO_2 -megkötés eredménye (Máthé, Zsigmond, 2022). Az oxigéntelítettség tendenciózus növekedése is megfigyelhető, a fenék közelében sem csökken 60% alá, ami ugyancsak az algák fotoszintézisének az intenzívebbé válását mutatja, a tó eutrofizálódását indikálja. A Secchi-átlátszóság a tóban 2019–2020 években átlagosan 1,58 m volt, ami eutróf állapotot jelez, az algák elszaporodása miatt az

átlátszóság a 2012-2013 évben mért értékeknek a felére-harmadára esett vissza (Máthé és Vörös, 2022). A tó a 2019–2020 években az összfoszfor koncentráció éves átlaga (19 $\mu\text{g/l}$) szerint mezotróf, az átlagos a-klorofill koncentráció (33 $\mu\text{g/l}$) alapján hipertróf állapotú volt (Vörös és Máthé, 2022a).

A Szent Anna-tóban a fitoplankton szabályozásában a zooplankton nem játszik szerepet ez utóbbi szinte teljes hiánya miatt, amit a tóban a 2010-es évek elején észlelt, invazív ezüstkárász (*Carassius gibelio*) okozhat zooplankton fogyasztásával (Vörös és Máthé, 2022b).

A paleolimnológiai kutatások kimutatták, hogy a tó vízkémiáját jelentősen befolyásolták a kráterbelső -mint a tó vízgyűjtője- talajösszetételének változásai. A kráterben a lucfenyő dominanciájával jellemezhető időszakokban a talajoldat szerves-sav, Fe és Mn koncentrációja magas volt, és ezek az anyagok bemosódtak a tóba, ahol kiülepedtek, vagy a primér producensek számára váltak elérhetővé. A pH csökkentése a *Sphagnum* fajok és az acidobionta kovamoszatok terjedését segítette elő, és alacsony tó-produktivitást hoztak létre a korai- és középső-holocénben és újabban az emberi tényező által indukált tóparti vegetáció változások során. Ezzel ellentétben a bükk és gyertyán tóparti vagy kráteroldali megtelepedésének következtében kialakuló talajváltozások a tó vizének növekvő produktivitását váltották ki, gyorsabb üledékakkumulációval és ezáltal gyorsabb feltöltődést kiváltva. A megfigyelt változások egy érzékeny összefüggést sejtetnek a tóparti vegetáció és talaj valamint a tó vizének termékenysége között, ami úgy tűnik, hogy a vízgyűjtő-tó interakciók kulcseleme a Szent Anna-tó esetében (Magyari et al., 2009).

2.2. Természetvédelem

A Szent Anna-tó kráter a „ROSCI0248 Szent Anna-tó–Mohos-tőzegláp Közösségi Jelentőségű Natura 2000 Terület”, illetve a „2486 Szent Anna-tó Nemzeti Jelentőségű Természetvédelmi Terület” részét képezi.

A terület hasznosítását meghatározó keretet a Környezetvédelmi Minisztérium 1408/2017. sz. Rendelete („A Környezetvédelmi Minisztérium 1408/2017 rendelete a Mohos Tőzegláp – Szent Anna-tó ROSCI0248 menedzsmenttervének és szabályzatának jóváhagyásáról”) által jóváhagyott kezelési terve szabályozza, amely az 57/2007-es sürgősségi kormányrendelet („A Védett területek jogrendjét, a természetes élőhelyek, a természetes flóra és fauna védelmét szabályozó 57/2007.-es sürgősségi kormányrendelet”) alapján a területrendezési, helyi és nemzeti fejlesztési és minden egyéb a természetes erőforrások kitermelését/hasznosítását előíró terv fölé van rendelve, ez utóbbiak kezelési terv előírásaihoz kell illeszkedjenek.

A „2486 Szent Anna-tó Nemzeti Jelentőségű Természetvédelmi Terület” botanikai, geológiai és tájvédelmi természetvédelmi terület, amelyet Harghita Megye Tanácsa a 162/2005.-ös határozatával helyezett előzetes védelem alá, illetve a Nemzeti Területrendezési Tervet jóváhagyó 5/2000. sz. törvény („5/2000 törvény a nemzeti területrendezési terv jóváhagyásáról – III. rész – védett területek”) által nyilvánították védetté, határait a Szent Anna-kráter pereme képezi.

A „ROSCI0248 Szent Anna-tó–Mohos-tőzegláp Községi Jelentőségű Natura 2000 Terület” a Környezetvédelmi és Fenttartható Fejlődés Minisztériumának 1964/2007. sz. rendelete („A Környezetvédelmi és Fenntartható Fejlődés Minisztériumának 1964/2007 rendelete a közösségi jelentőségű területek, mint az európai Natura 2000 ökológiai hálózat Romániai részeinek védett területté történő nyilvánításáról”) alapján lett közösségi jelentőségű védett területté nyilvánítva, a következő közösségi jelentőségű élőhelytípusok védelmében: 6430 -Üde, tápanyaggazdag magaskórósok; 7110* -Dagadólápok; 7140 -Tőzegmohás lápok és ingólápok; 91D0* -Tőzeglápok erdei vegetációval; 91E0* -Puhafás ligeterdők, éger- és körisligetek, illetve láperdők (*Alno-Padion*, *Alnion incanae*, *Salicion albae*); 91V0 -Dák bükkösök (*Symphyto-Fagion*); 9410 -Hegyvidéki lucosok (*Vaccinio-Piceetea*).

Védett kételtű és hullőfajok: *Bombina variegata*; *Triturus cristatus*; *Triturus montandoni*.

Védett növényfajok: *Ligularia sibirica*; *Meesia longiseta*.

Az erdőgazdálkodás a hatályos üzemterv szerint végezhető, a kezelési tervvel történt harmonizációja következtében.

2.3. Erdőgazdálkodás

2.3.1. Jogi háttér

Romániában az erdőgazdálkodást az erdőtörvény (46/2008 sz. erdőtörvény) szabályozza. Az erdőtörvény hatálya kiterjed a teljes országos erdőállományra és az erdőállományon kívüli fás vegetációval borított területekre. Az erdőállomány magán- és köztulajdont is képez, nemzeti érdekességű közkinccs. Az erdő tulajdonjogának gyakorlása az erdőtörvény hatályos rendelkezései szerint történhet, a teljes országos erdőállományra nézve kötelező az erdészeti szakszolgáltatások biztosítása, tulajdonjogra való tekintet nélkül, a törvény értelmében engedélyezett erdészeti hivatalok vagy erdészeti kutatóintézetek által. A természetvédelmi területek részét képező erdőállományok esetében az üzemtervek elkészítése a természetvédelmi kezelési tervekkel összhangban kell történnjen, a környezetvédelmi kiértékelési eljárások betartásával.

Az erdők szerepükkel összhangban két fő rendeltetés (funkcionális csoport) szerint csoportosítandók, védelmi elsődleges rendeltetésű erdők (I. csoport), amely magában foglalja a speciális víz-, talaj-, klímavédelmi és nemzeti érdekeltségű objektumok védelmét szolgáló, rekreációs célú, génalap és ökológiai alap védelmét szolgáló, valamint a nemzeti érdekeltségű természetvédelmi területek erdőit, valamint gazdasági és védelmi elsődleges rendeltetés (II. csoport) amely magába foglalja a faanyagtermelés és erdei melléktermékek előállítását biztosító és a környezeti tényezők minőségének a védelmét szolgáló erdőket.

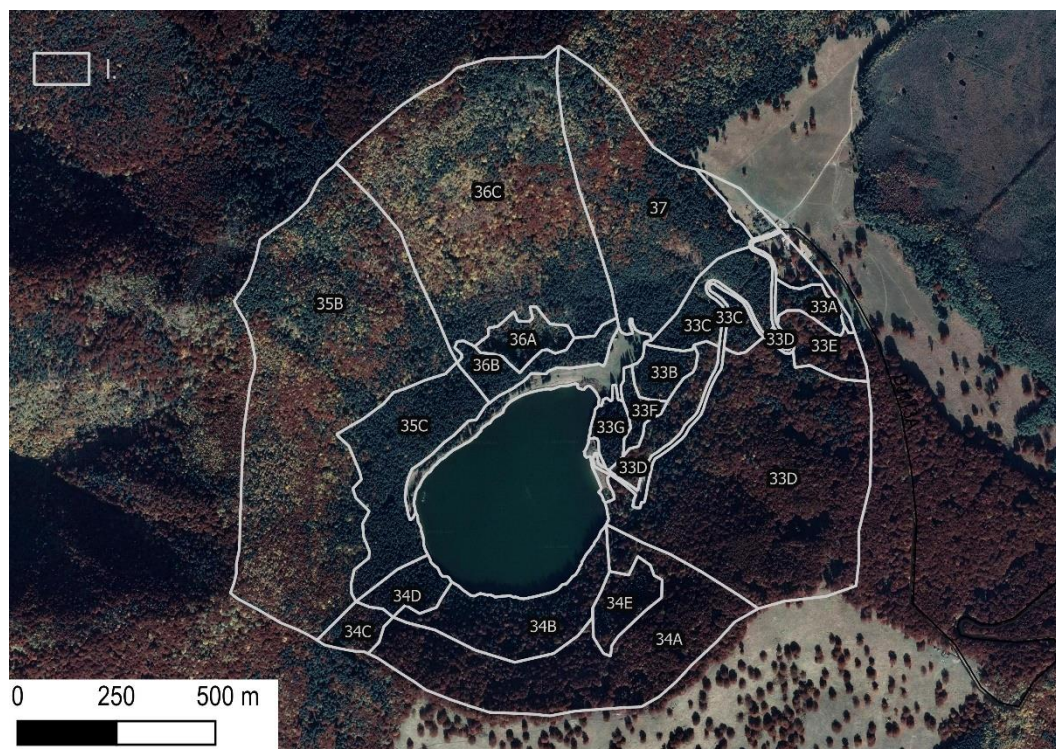
Az erdőgazdálkodási módok minden rendeltetés esetében differenciáltan kerülnek meghatározásra az üzemtervezés során megállapított elsődleges rendeltetés és funkcionális kategória jellegének és intenzitásának függvényében.

2.3.2. A hatályos üzemterv

Az aktuális üzemterv (Vodă és Raclariu, 2017) 2017. január 1. és 2026. december 31. időszakra érvényes, a Vízügyi és Erdészeti Minisztérium 26/07.02.2018 rendelete alapján lépett hatályba. Az üzemterv a XLVI Szent Anna üzemegység 404,7 hektáros területére van elkészítve, ebből az erdőterületből a Szent Anna-tó kráter a terület kevesebb mint felét képezi. A továbbiakban csak a kutatási területre vonatkozó, a kráter belső lejtőit borító 33–37 erdőtagok részleteinek alapján történő jellemzésre kerül sor (4. ábra).

Az üzemterv a vágásos üzemmódot írja elő, rendeltetés alapján a kutatási terület faállományai mind elsődleges védelmi rendeltetésűek, a román besorolási rendszer alapján 1A védelmi kategóriába (források és egyéb vizek környezetében található erdők), 5N védelmi kategóriába (egyéb természetvédelmi területeken található erdők) illetve egy erdőrészlet (33C) esetében 4A védelmi kategóriába (hotelek, motelek, menedékházak és kempingek körül található erdők) vannak sorolva. Annak ellenére, hogy vágásos üzemmód van előírva, az elsődleges védelmi rendeltetés következtében nincs vágásérettségi kor előírás a kutatási területen található erdőrészletek esetében, vágásforduló nem értelmezhető.

A fiatal és középkorú állományokban az ápolások és a nevelővágások a vágásos erdőgazdálkodásra jellemző módon vannak meghatározva, az idős állományok esetében a speciális konserváló munkálatok kivitelezése van előírva, amelyek a román erdőgazdálkodási gyakorlatban értelmezett speciális vágáskategória, amely a felújítívágás jellegű és a nevelővágások egyszerre-történő, a védelmi célokat előtérbe helyező, szerkezetfüggő alkalmazását jelentő, készletgondozó fahasználathoz hasonló (Koloszár, 2009), de nem feltétlenül vegyes korú és szerkezetű erdő kialakítását és fenntartását célzó beavatkozásokat foglal magában. Meghatározás szerint a



4. ábra. A Szent Anna-tó belső kráterlejtőinek erdőrészelei a hatályos üzemterv szerint (Vodă és Raclariu, 2017); (Jelmagyarázat: I. erdőrészlet-határ); (műholdfelvétel: Google WMS)

konzerválás olyan beavatkozások összességét képezi, amelyeket idősebb, fokozatos felújítógátásokkal történő erdőfelújítás alól kivont védelmi rendeltetésű állományokban szükséges végezni, ezek egészségügyi állapotának megőrzése vagy javítása, a folyamatos erdőborítás megőrzése és a hozzárendelt védelmi szerep betöltése érdekében. A konzerváló munkálatok ezáltal magukban foglalják az egészségügyi fakitermelést, a megjelenő újulatok megjelenésének és fejlődésének elősegítését, az üres területek mesterséges felújítását, a cserjeszint és az alsó koronaszint létrehozását, kártevők és kórokozók elleni védekezést stb. A beavatkozások intenzitása állományfüggő, előre nem tervezhető (Nicolescu, 2014). Az üzemterv a beavatkozás maximális intenzitását szabályozza, ettől eltérni különleges jóváhagyások alapján lehetséges.

Az üzemterv szerint a kráterben található faállományok a hegyvidéki régió bükkösök és a bükk-fenyő elegyek társulásaira jellemző három típusba sorolható termőhelyeken tenyésznek. A román termőhely-osztályozási rendszer szerinti besorolást (Târziu, 1997) tekintve a „4420 -Hegyvidéki bükkösök közepes fatermőképességű, Asperula-Dentaria típusú termőhelye” (Montan premontan de făgete Bm brun edafic mijlociu cu Asperula-Dentaria), amelyen a „3316-Bükkös Oxalis-Dentaria-Asperula flórával” erdei ökoszisztéma típus fordul elő, a kráterbelső északi és nyugati kitettségű lejtőit jellemzi, mezotróf (közepes termékenységű) talaj jellemzi, mezohidrikus vízgazdálkodással (többletvízhatástól független, üde-félnedves vízgazdálkodási fok).

A „3332 -Hegyvidéki bükk-fenyő elegyek közepes fatermőképességű, Asperula-Dentaria típusú termőhelye” (Montan de amestecuri Bm brun edafic mijlociu cu Asperula-Dentaria) termőhelytípusba vannak sorolva a kráterbelső keleti és déli kitettségű lejtői, mezotróf-oligomezotróf (közepes–alacsony termékenységű) talaj jellemzi, mezohidrikus vízgazdálkodással (többletvízhatástól független, üde-félnedves vízgazdálkodási fok) amelyen a „3226 Luc-bükk elegy Oxalis-Dentaria-Asperula flórával” és a 1226-Lucos Oxalis-Dentaria-Asperula flórával” erdei ökoszisztéma-típusok találhatók.

Az erdők szerkezetét tekintve, a területarányos fafajösszetétel a kráterben 54B 31LF 10NYI 3EF 2RNY, a fatérfgatarány szerinti fafajösszetétel 51B 37LF 8NYI 3EF 1RNY. Az üzemtervi nyilvántartás szerint a területen található összes fatérfgogat 60986 m³, ez 346 m³ hektáronkénti átlagos fatérfgogatnak felel meg a kutatási területen.

A kor szerinti megoszlás alapján az állományok 1,2%-a található az I. (0–20 éves) korosztályban, 1,3%-a a II. (21–40 éves), 31,3%-a a III. (41–60 éves), 28,3%-a a IV. (61–80 éves), 4,7%-a az V. (81–100 éves), 16,7%-a a VI. (101–120 éves) és 16,4%-a a VII. (120 évesnél idősebb) korosztályban.

Az üzemtervi adatok szerint az átlagos záródás 80%-os, az állományok többsége a III. fatermési osztályba sorolható a romániai relatív fatermőképesség osztályozási rendszer szerint (Giurgiu és Drăghiciu, 2004), tehát közepes termőképességű. Az éves átlagos folyónövedék a kráterben 6,6 m³/ha. Az éves tervezett konzerválóhasználati fahozam 316 m³, a nevelővágások éves kitermelési lehetősége 170 m³/ha ami összesen 486 m³ éves fahasználati lehetőséget jelent.

A bükk esetében természetes úton magból felújult állományokról beszélhetünk, a lucfenyő egy része természetes úton újult fel, de viszonylag magas a mesterségesen felújított lucosok területaránya is (33C, 36A, 36B, 36C, 37 erdőrészekben). Az üzemterv leírások alapján a korszerkezet tekintetében az állományok többsége egykorú, vagy viszonylag egykorú, de fellelhetők vegyeskorú állományok is. A területen a legfontosabb destabilizáló tényezőként a szél említendő, amely dőléseket és töréseket idézhet elő. Annak ellenére, hogy a talajtani (sekély termőrétegű, homokos, homokos-vályog textúrájú és helyenként magas váztartalmú) és klimatikus tényezők favorizálják, ezeknek az eseményeknek az intenzitása viszonylag korlátozott, ami a vulkáni kráter nyújtotta széllel szembeni védelemmel, illetve az elegyetlen lucosok viszonylag kis kiterjedésével magyarázható. Nagyobb méretű széldöntés és széltörés 2020 februárjában történt a területen, de ennek jellege elszórt, tömörszerűen csak a 35C (0,1 ha) és 36C (0,6 ha) erdőrészekben okozott károkat.

3. ANYAG ÉS MÓDSZER

3.1. Állományszerkezetek vizsgálata

3.1.1 Állományszerkezetek vizsgálatának célja

A kráter belső lejtőjén fő fafaj szempontjából a bükkösök és lucosok elegendően állományai, illetve a két faj változó arányú elegyei találhatóak meg. Korszerkezet szempontjából az erdőgazdálkodás következtében jellemzően egykorú állományok alakultak ki a kráterben, de azonosíthatók vegyeskorú állományszerkezetek is, ezeken a részeken valamilyen okból kifolyólag nem történtek nagy intenzitású erdőművelési beavatkozások az elmúlt évszázad folyamán, a természetes folyamatok nagyobb mértékben tudtak érvényesülni.

Az állományfelmérések során a jellemző faállomány-szerkezetek azonosítása és szerkezeti jellemzőinek a rögzítése volt a cél. A Szent Anna-tó kráterében megtalálható különböző szerkezetű állományok képezik a kiindulópontot azoknak az erdőgazdálkodási javaslatoknak a megfogalmazása során, amelyeknek az alkalmazása a tó hosszútávú fenntartását elősegítheti. A különböző fafajösszetételű és korszerkezetű állományok közt jelentős különbségek lehetnek a tó vízgyűjtőjét képező kráter vízgazdálkodására gyakorolt hatásaik tekintetében. A lombkorona az állományklímára jelentős hatást gyakorol, záródása mellett ennek függőleges irányú kiterjedése (mélysége) is fontos tényező lehet, kihatva az egyes szintek hőmérsékletére, páratartalmára, a légmozgásokra. Az adatok feldolgozása során a koronarészarány és a koronaalappmagasság statisztikai elemzése által vizsgáltam a különböző korú/korszerkezetű állományok lombkoronájában és törzsterében megjelenő eltéréseket.

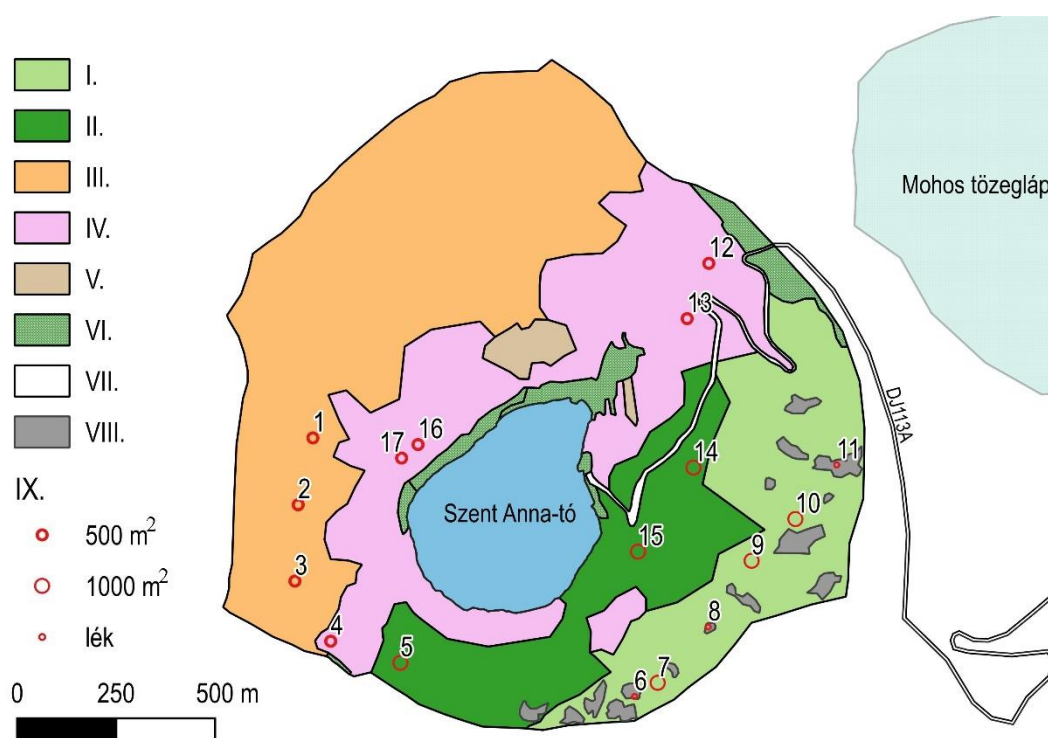
Az állományszerkezetek felmérése során a következő kérdésre kerestem a választ:

- Melyek a Szent Anna-kráter legjellemzőbb állományainak főbb szerkezeti jellemzői?
- Vannak-e olyan eltérések az állományok közt, amelyek az állományklíma eltérő alakulását válthatják ki?

3.1.2. Állományszerkezetek vizsgálatának munkamódszere

Az állományfelmérés során a fafaj- és korszerkezet tekintetében a Szent Anna kráterben legjellemzőbb állományszerkezetekben jelöltem ki mintaterületeket, ezek a középkorú bükkösök, idős bükkösök, középkorú lucosok és a vegyeskorú bükk állományok (6. ábra). Az állományszerkezetek felvételezése során a kráter teljes erdőállományának reprezentatív felmérése nem volt cél, a kráter szintjén ezt a hatályos üzemterv többé-kevésbé jól visszatükrözi, a felmérések az infiltrációsebesség és a szabad víz megjelenését vizsgáló kutatások helyszínein történtek, a kutatott folyamatok eredményeinek és az egyes állományszerkezetek összehasonlításának

érdekében. A felmérések során középkorú bükkösben és lucosokban 500 négyzetméteres, az alacsonyabb hektáronkénti törzsszámmal jellemezhető idős bükkösben és a vegyeskorú állományban 1000 négyzetméteres körös mintavétel volt végezve. Minden mintaterület esetében felvételezésre kerültek a próbatér általános adatai (azonosító, felvétel időpontja, koordináták, lejtés, kitettség, az állomány záródása) és a faegyedek adatai, így a fafaj, átmérő, fa magassága, Kraft osztály, a koronakezdet magassága, koronaátmérő és a faegyed poláris koordinátái a mintaterület középpontjához viszonyítva. A cserjeszint fő adatai is rögzítésre kerültek. Az átmérő 1 centiméter pontossággal, a magasság 0,1 méteres pontossággal volt meghatározva. A záródást (az egybekapcsolódott lombsátorvetület és az állomány területének viszonzyszámaként értelmezve) szembecsléssel értékeltém. A famagasság és a koronakezdet magasságának méréséhez Nikon Forestry Pro hipszométert került alkalmazásra. A mérések a 2020. év folyamán voltak végezve. Az állományfelmérések mintaterületei az 5. ábrán láthatók.



5. ábra. Állományfelmérések mintaterületei a Szent Anna-tó kráterében (I. idős egykorú bükkös, II. vegyeskorú bükkös luc és jegenyefenyő elegyedésével, III. középkorú bükkös, IV. középkorú lucos, V. fiatal bükk-fenyő elegy, VI. gyeper, VII. aszfaltozott műút és parkoló, VIII. lék idős bükkösben, IX. mintaterület)



6. ábra. Különböző állományszerkezetek a Szent Anna-tónál (balra fent: középkorú bükkös, jobbra fent: középkorú lucos, balra lent: idős egykorú bükkös, jobbra lent vegyeskorú bükkös)

Az adatfeldolgozás során meghatároztam az állomány főbb szerkezeti jellemzőit, ezeket táblázatos, vagy grafikus ábrázolási formában mutattam be.

Az átlagos törzstávolságot a háromszög-kötés szerinti elméleti fatörzselhelyezkedést alapul véve a hektáronkénti törzsszám (N) függvényében határoztam meg.

A biológiai felsőmagasságot a kimagasló fák (I. Kraft osztály) körlappal súlyozott átlagmagasságának (Veperdi, 2008) értelmeztem és számítottam. Az állományok korát az üzemtervi leírások alapján határoztam meg, fatermőképességi besorolását a romániai relatív fatermési táblák alapján (Giurgiu és Drăghiciu, 2004) határoztam meg az állományokra.

Az egykorú állományok (középkorú bükkös, idős bükkös, középkorú lucos folyónövedékének becslését a romániai relatív fatermési táblák (Giurgiu és Drăghiciu, 2004) alapján végeztem. A vegyeskorú állományszerkezetek esetében a folyónövedék becslésére a romániai fatermési táblák nem kínálnak elfogadható megoldást. A fatérfogat számításához a térfogat bifaktoriális regressziós egyenletével számítottam (Giurgiu et al., 2004):

$$\log v = a_0 + a_1 \log d + a_2 \log^2 d + a_3 \log h + a_4 \log^2 h \quad (1.)$$

amelyben v a fa térfogatát, d az átmérőjét, h a magasságát jelenti, a_1, a_2, a_3, a_4 fafajra jellemző együtthatók.

Az egyes állományokban feltérképezett mintaterületek szemléltető megjelenítéseit WinSVS 3.16 szoftver segítségével készítettem el, ezeket a modelleket az 1. melléklet tartalmazza.

Az állománytérképezés során az idős bükkösben létrehozott lécek általános jellemzését is elvégeztem.

3.1.3. Állományszerkezetek vizsgálata során alkalmazott statisztikai módszerek

Tekintettel arra, hogy a kortól, illetve fafajtól függő változók magától értetődő különbségeinek statisztikai szempontból történő elemzése értelmetlen a különböző fajú, korú, korszerkezettű állománykategóriák esetében, az egyes állományok főbb szerkezeti jellemzőinek feltárása és bemutatása után a kortól kevésbé függő állományszerkezeti jellemzők, a koronarészarány és a koronakezdet-magasság esetében végeztem összehasonlító vizsgálatokat a középkorú bükkös, idős bükkös, vegyeskorú bükkös és középkorú lucos esetében, a szabad víz megjelenésének vizsgálati helyszíneit képező mintaterületekre. A statisztikai feldolgozások során 5%-os szignifikanciaszintet választottam. A normalitásvizsgálatot Shapiro-Wilk teszttel végeztem. Mivel a mintaterületek többségénél a normalitási feltétel nem teljesült sem a koronarészarány, sem a koronakezdet-magasság tekintetében, a továbbiakban az összehasonlításokat nemparametrikus, Kruskal-Wallis ANOVA segítségével végeztem. A statisztikai elemzésekhez Statistica 13.5.0.17 szoftvert használtam.

3.2. A talajinfiltráció sebességének vizsgálata az egyes állományszerkezetek és felszínborítási kategóriák esetében

3.2.1. Talajinfiltráció-sebesség vizsgálatának célja

A vizsgálat célja a talajok infiltrációs rátájának az összehasonlítása a különböző felszínborítási viszonyok mellett (különböző faállományok, gyepek, földutak) a kráter belső lejtőin. A cél a Szent Anna-tó vízmérlegét tápláló komponensek megismerése mellett azoknak a

hordalékforrásoknak az azonosítása volt, amelyek nagy intenzitású csapadékesemények alkalmával a tó szedimentációjához hozzájárulnak. Az egyes felszínborítási kategóriák vízfelvételi hatékonyságának megismerése által ezek talajvédelmi szerepéről is pontos információt kapunk. Azonosíthatóvá válnak azok a helyi talajtulajdonságok és feltételek, amelyek elősegítik a felszíni vízfolyások kialakulását, illetve azok a földhasznosítási kategóriák, amelyek biztosítják a talaj magasabb infiltrációsebességét és ezáltal a nemkívánt eróziós jelenségek kialakulásának gyakoriságát és intenzitását lecsökkentik. Az egyes faállomány-kategóriák talajvédelmi szerepében megjelenő különbségek azonosítása is jelentős szereppel bírhat az erdőgazdálkodásnak a védelmi célokhoz történő igazítása során.

A vizsgálat során a következő kérdésekre próbálok választ találni:

- A Szent Anna-tó feltöltődése szempontjából az erdők felelősek-e azoknak a felszíni vízfolyásoknak a kialakulásáért, amelyek a hordalékot a tóba szállítják?
- Az intenzív csapadékesemények alkalmával miért nem tud a csapadék a talajba beszivárogni, miért alakulnak ki a felszíni vízfolyások?

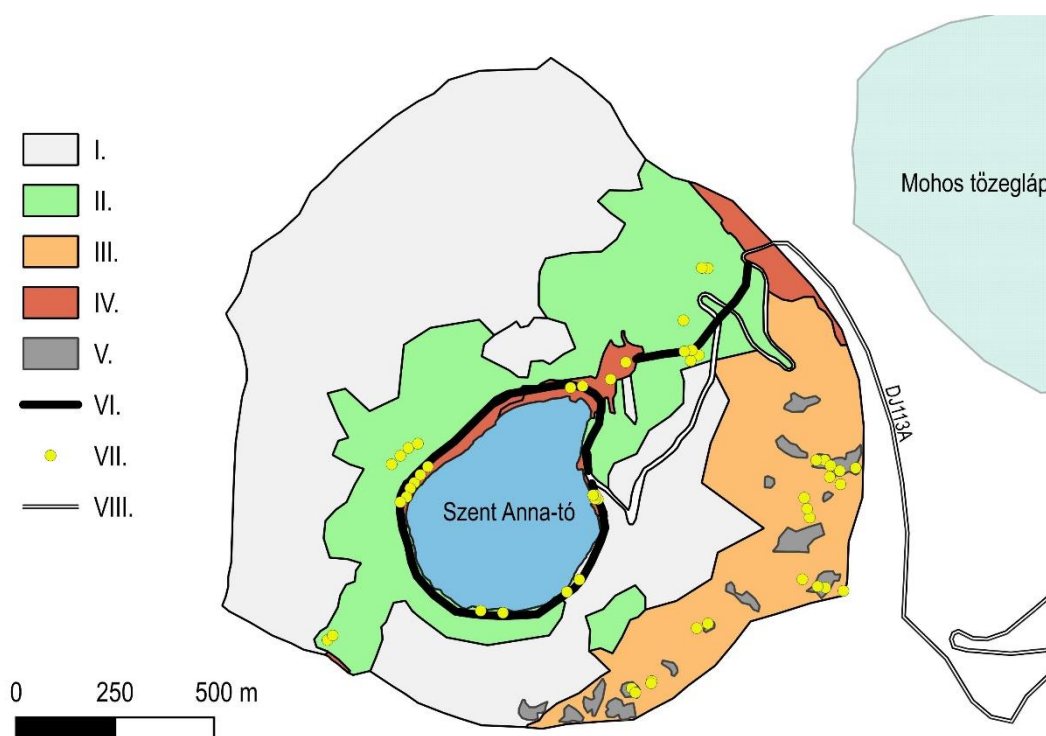
A felszínborítás és a talajinfiltráció kapcsolatát számos kutatás vizsgálta világszinten. Bens és munkatársai az erdőszerkezet és fafaösszetétel megváltoztatásának hatását vizsgálták a pedohidrológiai paraméterekre (Bens et al., 2007). A különböző állományokban különbségeket mutattak ki a hidraulikus konduktivitás értékeiben. Az erdő megváltozása a talajok tulajdonságainak a változását vonta maga után, a humusz jellege és a humuszos talajszint vastagsága megváltozott, ezt a mikroklíma és az avar minőségi és mennyiségi megváltozásával magyarázták. A talajinfiltrációs rátát befolyásoló talajtulajdonság-változások álltak be a Kanári Szigetek mezőgazdasági termelési céllal erdőirtással érintett, majd felhagyott talajok esetében. Igazolták, hogy a talajaggregátumok arányának és a talaj szerkezeti stabilitásának csökkenése jelentősen kisebb talajinfiltrációs rátát eredményezett (Neris et al., 2012). Chen és munkatársai kimutatták, hogy az erdőművelési beavatkozások jelentősen megnövelhetik a talajinfiltrációs rátát, és a talajok víztartó képessége szabályozható az állomány sűrűségének alakításával (Chen et al., 2014).

3.2.2. A talajinfiltráció sebességének vizsgálati módszere

3.2.2.1. A mintaterületek kiválasztása

A mintavételezés legfeljebb 20°-os dőlésszögű lejtőkön, három felszínborítási kategóriában történt: erdők, gyepek és földutak. Az erdő felszínborítási kategória esetében három alkategória lett meghatározva, ezek az idős bükkös, középkorú lucos és a bükk-lék (7. ábra). Az erdőkben

kijelölt mintavételi helyeken az állományfelmérésről szóló fejezetben leírt munkamódszer (3.1.2. fejezet) alapján lettek meghatározva a fő állományszerkezeti jellemzők, a mérések az állományfelmérés mintaterületein, helyenként azoknak közelében, ugyanolyan állományszerkezetben voltak végezve. A középkorú és a vegyeskorú bükkösök esetében a talajinfiltrációsebesség mérésére nem volt lehetőségem, a mérésekhez szükséges felszerelés és vízmennyiség eljuttatásának nehézsége miatt, ezeknek az állományoknak a közelítőutakhoz viszonyított elhelyezkedése következtében.



7. ábra. Talajinfiltráció mérési helyei a Szent Anna-tónál (Jelmagyarázat: I. nem vizsgált állomány; II. középkorú lucos; III. idős egykorú bükkös; IV. gyep; V. lék idős bükk állományban; VI. földút; VII. mérési hely; VIII. aszfaltozott műút)

Faállományok esetében a mérési helyek a környező fák törzsei által körbezárt területrész központjában lettek elhelyezve. A földutak esetében a mérések csak a kevésbé erodált (ahol a talaj organo-minerális szintje megmaradt) talajfelszínen voltak végezve, általában vízszintes vagy enyhe lejtésű helyeken.

3.2.2.2. Az infiltrációs ráta meghatározása

A beszivárgási folyamat révén a felszínen levő víz (csapadékból, hóolvadásból, öntözésből, odafolyásból stb.) a talajba jut. A beszivárgás mennyisége eszerint az a vízmennyiség, ami a felszínről bekerül a felszín alá, vízoszlop-magasságban értelmezve általában mm-ben szokás megadni (a csapadékhoz és párolgáshoz hasonlóan). A beszivárgás intenzitásának, az

időegység alatt beszivárgott mennyiségnek, a szokványos mértékegysége a mm/h. Hidrológiai jelentősége abban áll, hogy döntően befolyásolja az evapotranszpiráció és a felszíni lefolyás egymáshoz való viszonyát. A beszivárgás intenzitásának időbeni változását az infiltrációs görbe írja le. A talajok permeabilitása szempontjából a talajszemcsék, illetve a köztük levő pórusok mérete, méreteloszlása a meghatározó. A beszivárgás intenzitása kezdetben nagyobb, ezt víznyelési szakasznak nevezik, mert a csapadék nem a természetes tározóképességének a határáig benedvesedett talajra hull, hanem annál szárazabbra. Ebben a fázisban a talaj több vizet képes elnyelni, mint amennyit át tud eresztetni, mert lehetőség van a víz tározódására is. Egy idő után a beszivárgási sebesség gyakorlatilag állandósul, ez a vízáteresztő-képesség, az a vízmennyiség, amit a vízkapacitásig telítődött talajréteg időegység alatt átenged (Gombos, 2011). A vízáteresztési szakasz beszivárgási intenzitását állandósult infiltrációs rátának nevezzük.

Abban az esetben, ha a csapadékesemény intenzitása meghaladja a talaj infiltrációs rátáját, a talajfelszínen víz jelenik meg és a felszíni lefolyás folyamata beindul, amely hordaléktransporttal járhat, a felszín eróziója során szervesanyag és szervesetlen üledék távozhat.

Az állandósult beszivárgási ráták meghatározása úszószelepes kettős-gyűrűs infiltrométerrel történt, az állandósult vízoszlop módszerét alkalmazva. A kettős-gyűrűs infiltrométer előnye az egyszerű (egy gyűrűs) infiltrométerhez képest az infiltráció vertikális komponensének a leválasztása, az oldalirányú beszivárgást a két gyűrű közti részből (amelyben a belső gyűrűben levő vízoszlop-szinttel megegyező vízoszlop-szint van fenntartva) történő beszivárgás kompenzálja. A használt infiltrométerek belső gyűrűjének átmérője 220 mm, a külső gyűrű átmérője 380 mm, a gyűrűk (acélhengerek) palástmagassága 400 mm volt (8. ábra).

Az infiltrométergyűrűk talajba süllyesztése vertikálisan, koncentrikusan történt, 150 mm mélységig. A beillesztés beütéssel történt, a talaj és az avarszint minimális bolygatását szem előtt tartva a belső hengerben és a két henger közti térben egyaránt. A lejtőkön történő alkalmazás során, ahol a vertikális telepítés miatt a beütés mélysége a henger teljes kerületén változik, a belső henger lejtő felőli oldalának 150 mm-es mélységbe történő juttatásával történt (Szmolka és Frank, 2022a). A Zhang és munkatársai által leírt módszert alkalmazva (Zhang et al., 2017) a belső henger és a két henger közti részben a talajfelszín egy finomszövésű vászon anyaggal lett borítva és erre egy homokréteg (20-30 mm) került, az esetleges makropórusok által kiváltott preferenciális szivárgások hatásának csökkentése érdekében. A belső hengerben, illetve a két gyűrű közti térben úszószelepek segítségével volt biztosítva a vízoszlop állandó magassága a mérés során (egy megközelítően 25 mm magas vízoszlop volt biztosítva a belső gyűrű geo-

metriai középpontjában mérve, az elhelyezett homokréteg felszínétől számítva), a két gyűrű közti tér vízszintje a belső gyűrű vízszintjével megegyezőre volt beállítva.



8. ábra. Talajinfiltráció mérése bükk-lékben a Szent Anna-tónál

A víz biztosítása a belső gyűrűben és a két gyűrű közti részben különálló víztartályokból (200 mm átmérőjű 1 m magas) történt. A vízbeszivárgás sebességének a leolvasása a belső gyűrű tápláló tartályának oldalán elhelyezett skálázott leolvasócső segítségével történt. A mérések az infiltrációs ráta állandósulásáig voltak végezve, ez általában nem haladta meg a 180 percet. Az infiltrációs ráta (mm/h) meghatározása a tápláló tartályok vízszint esésének leolvasásával történt, a mérés időpontjának (óra, perc, másodperc) pontos lejegyzésével. A mérésekhez szükséges nagy vízmennyiség miatt a járművön tárolt víz (600 l) kerti öntözőcsövek segítségével volt a mérések helyszínére juttatva (Szmolka és Frank, 2022a).

3.2.2.3. Talaj fizikai-féleség, térfogattömeg, vázartalom és szerves szén-tartalom meghatározások

A talaj térfogattömegének meghatározását a Dincă és munkatársai által leírt módon végeztem (Dincă et al., 2012), minden infiltrációmérési helyen a meghatározás érdekében a talaj felső szintjéből volt talajminta vételezve. A mintavétel acélhenger segítségével, a talaj felszínéről vertikális irányban történő leütésével majd a minta kiemelésével történt. A mintavétel az infiltrációmérési hely közvetlen közelében (kevesebb mint 0,5 m távolságra) volt végezve és nem annak a helyén, mivel az infiltrométer hengereinek eltávolításakor itt a talajfelszín általában sérült, a talaj bolygatva lett. A minták térfogata 250 cm^3 volt (105 mm hosszú, 55 mm átmérőjű

henger). A mintákat 105°C-on szárítottam, a váztartalom 2 mm-es szitával került eltávolításra. Száraz tömeg, váz-tömeg és térfogat, talaj fizikai félesége, talaj-térfogattömeg, váz térfogat-arány került meghatározásra (Szmolka és Frank, 2022a). A minták szerves széntartalmának meghatározása kálium-dikromátos módszerrel (Jakab és Krézsek, 2008) került elvégzésre.

3.2.2.4. A talaj tömörségének a meghatározása

Talajpenetrométer (Wile Soil Compaction Tester) segítségével mértem a talaj tömörségét minden mintavételi helyen. A tömörség-vizsgáló műszer beszúrása alatt a legmagasabb mért érték került feljegyzésre a talaj felső 15 cm-es rétegét tekintve. Minden esetben három mérést végeztem, ezeknek átlagát számítottam a talaj tömörségének kifejezésére (kg/cm^2). Minden talajtömörség-mérés egy késő-tavaszi napon, egy csapadékos periódust követő két csapadék nélküli nap után történt (Szmolka és Frank, 2022a).

3.2.3. A talajinfiltráció sebességének vizsgálata során alkalmazott statisztikai módszerek

A mérések három faállománytípusban (idős bükkös, középkorú lucos és bükk-lék) és két másik földhasználati kategóriában, a gyepen és a földutakon lettek elvégezve. Minden kategóriában 10 mintavételi helyen volt mérés, kivéve a lucosokat, ahol a mintavételi helyek összeszámolási hibája miatt 11 mérés került elvégzésre. Ennek ellenére meghagytam a 11 mérést az eredmények manipulációjának elkerülése érdekében. A statisztikai elemzést Statistica 13.5.0.17 szoftverrel végeztem. Két különböző tényező hatását elemeztem:

- a. A különböző faállomány-kategóriák hatását (idős bükkös, középkorú lucos és bükk-lék) a talaj infiltrációs rátájára az erdők esetében;
- b. A földhasználati kategória hatását (erdő, gyep, földút) a talajinfiltráció sebességére.

A statisztikai feldolgozás során 5%-os szignifikanciaszintet választottam. A normalitásvizsgálatot Shapiro-Wilk teszttel végeztem. A három faállomány-kategória esetében egyszempontos varianciaanalízissel vizsgáltam az átlagok különbözőségét. A varianciák azonosságát Levene próbával ellenőriztem. Tukey Unequal N HSD post-hoc tesztet alkalmaztam a kategóriák közötti különbségek értékelésére. A földhasználati mód hatásának vizsgálatát (erdők, gyep, földutak) Kruskal-Wallis ANOVA segítségével végeztem, mert a normalitási feltétel a földutak kategória esetében nem teljesült.

A fent leírt hatások elemzését követően korrelációanalíziseket végeztem az infiltrációs ráta értéke és a vizsgált talajtulajdonságok (térfogattömeg, váztartalom, szerves széntartalom, és talajtömörödés) közti esetleges összefüggések feltárására. A talajtömörség közti eltéréseket az

egyres földhasználati kategóriákban (faállományok, gyepes, földutak) Kruskal-Wallis ANOVA segítségével vizsgáltam, mert a varianciák azonosságának a feltétele nem teljesült.

3.3. A Szent Anna-tó vízmérleg komponenseinek vizsgálata

3.3.1. A vízmérleg komponensek vizsgálatának célja

A tó vízmérlegével kapcsolatosan a különböző szakirodalmi források eltérő kijelentéseket fogalmaznak meg. Egyes források szerint a tó vize csapadékvíz eredetű, a vízmérleg tápláló komponensét a légköri csapadék képezi (Gelei, 1909, Jánosi és Péter, 1995, Kis és Palcsu, 2022), más szerzők jelentős szerepet tulajdonítanak a hóolvadás során a kráterből lefolyó vízmennyiségnek (Pál, 2000). Gâștescu és Driga (Gâștescu és Driga, 1983) a felszíni hozzáfolyást a tavat jelentős mértékben (57,36%; 222.000 m³/év) tápláló komponensként, csökkentő komponensként a párolgás mellett a felszín alatti elszivárgást (68,73%; 266.000 m³/év) is említik. A felszín alatti hozzáfolyás kérdése is nyitott, ennek létezése nem kizárható. Magyarai és munkatársai szerint a holocén folyamán bekövetkezett fafajösszetétel változások következtében a kráterben levő erdők különböző mértékű intercepciója a tó mélységét is befolyásolta, mert víz egy része felszíni hozzáfolyásból származik (Magyarai et al., 2009).

A kráterben található faállományok szerepének a tisztázása a Szent Anna-tó vízmérlegének szempontjából csak ez utóbbinak a pontosabb megértésével lehetséges, ezért a vízmérleg komponenseinek a kutatása az erdő-tó kapcsolatrendszer értékelésének szempontjából elengedhetetlen volt. A vizsgálat során a következő kérdésre kerestem a választ:

- Melyek a Szent Anna-tó vízmérlegének a legfontosabb komponensei?

3.3.2. A vízmérleg komponenseinek vizsgálati módszere

A hidrológiai rendszerek elemzése a tömegmegmaradás törvényére épülő vízmérleg-megközelítésen alapul. A vízmérleg-megközelítés alapösszefüggése a hidrológiai egyenlet, amelynek fogalmi alakja az alábbi módon írható fel (Mádlné Szőnyi et al., 2013):

$$Befolyás = Kifolyás \pm \Delta S \quad (2.)$$

ahol ΔS a tározásban bekövetkező változást jelöli. Az egyenlet kisméretű tavak esetében a következőképpen írható fel (Gombos, 2011):

$$CS + H + H_a - (P + E + E_a + SZ) = \Delta S \quad (3.)$$

amelyben CS a csapadékot, H a felszíni hozzáfolyást, H_a a felszín alatti hozzáfolyást, P a párolgást, E a felszíni elfolyást, E_a a felszín alatti elfolyást, SZ a mélyebb rétegekbe történő vízszivárgást jelképezi.

A Szent Anna-tó esetében állandó felszíni hozzáfolyások és elfolyások nincsenek, felszíni hozzáfolyások láthatók záporosók alkalmával, a (3.) egyenlet felszíni hozzáfolyás (H) komponensét ezáltal a nagy intenzitású esők és a gyors hóolvadás epizódjai képezik. A kráter viszonylag meredek belső lejtőit figyelembe véve a felszín alatti elfolyás (E_a) komponens behatárolt, tekintettel arra, hogy a talaj a tó körül magasabban helyezkedik el, és ez a szint folyamatosan emelkedik, ez a komponens a vízmérleg mélységi elszivárgás (SZ) összetevőjével asszimilálható. Az előbb leírtak alapján a Szent Anna-tó vízmérleg modellje az alábbi alakban írható fel:

$$CS - P + (H + H_a - SZ) = \Delta S \quad (4.)$$

Abból a feltételezésből kiindulva, hogy a vízmérleget döntő módon a csapadék (CS) és a párolgás (P) befolyásolja, ezen komponensek megismerését tűztem ki célul, a terepi mérések a csapadék és párolgás meghatározása érdekében voltak végezve. A tározásban bekövetkező változásokat a tó vízszintváltozásai alapján fejeztem ki. A $(H + H_a - SZ)$ komponensek összhatását a Szent Anna-tó vízszintjének csapadék és párolgás által nem magyarázható változásaiként lehet meghatározni.

A csapadékot és a vízszint-változásait közvetlen mérések alapján határoztam meg. A párolgás kiszámítására a tó vízfelszín-hőmérsékletének, a léghőmérsékletnek, a szélesebességnek és a relatív páratartalomnak az értékei kerültek rögzítésre.

A tó tározott vízmennyiségének változásait milliméterben fejeztem ki (a vízszint változása alapján). Annak ellenére, hogy a vízmérleg modellek esetében általában térfogat-egységek használatosak, a felszíni vízfolyásokkal nem rendelkező Szent Anna-tó esetében a vízszint, a vízszlop-magasság mm-ben megadott változása egy kényelmes és egyszerű módját képezi az adatok kezelésének és ábrázolásának. Az értékek átszámítása volumetrikus egységekre bármikor megtehető a tó területének, ismert mederalakjának felhasználása segítségével (Szmolka és Frank, 2022b).

Annak következtében, hogy a párolgás közvetlen mérése nem volt lehetséges, az elpárolgott vízmennyiségek kiszámítása érdekében Meyer empirikus képletét (Meyer, 1942) alkalmaztam, ennek eredeti, metrikus egységekre átalakított alakjában:

$$P = C(P_s - P_a) \left(1 + \frac{W_{7,6}}{16}\right) 0,75006 \quad (5.)$$

amelyben P a párolgás (mm), C a párolgási tényező, P_s a telítődési párányomás a víz- és jégfelszínen (hPa), P_a az aktuális atmoszferikus vízpárányomás (hPa), $W_{7,6}$ a szélesség 7,6 méterrel a felszín fölött (km/h). A C párolgási tényező értéke 11,1 (a hőmérő ~1 méteres vízszint felett történt elhelyezése és az április–október hónapok átlagos atmoszferikus párányomásának (12 hPa) értéke szerint lett kiválasztva).

A szélesség mérése ~1,3 méterrel a vízszint fölött történt, ennek átalakítását a 7,6 m-es magasságra a szélerőprofil törvény (Davenport, 1960) képletével végeztem:

$$W_z = W_r \left(\frac{z}{z_r}\right)^\alpha \quad (6.)$$

A képletben W_z a szélességet jelöli egy adott z magasságban, W_r a referenciaszinten mért szélesség, z a magasság, amelyre a szélességet ki kell számolni, z_r a referenciaszint, amelyen a szélesség-mérés történik, α empirikus együttható, amelynek az értéke 1/7.

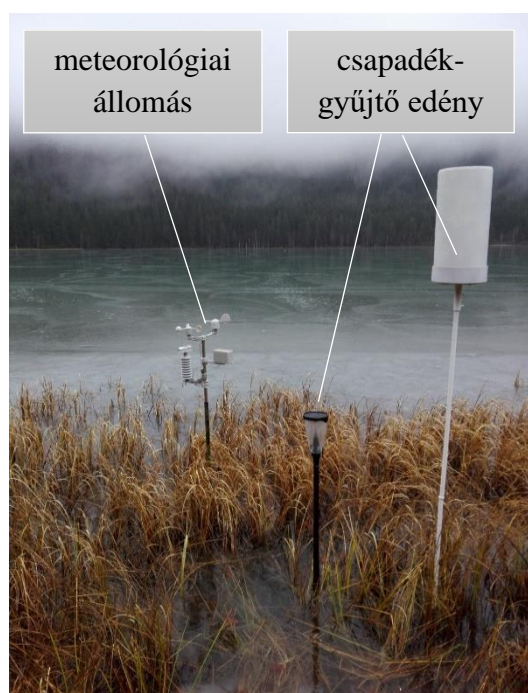
A víz és jég fölötti telítődési párányomás értékei Huang képletével (Huang, 2018) lettek meghatározva:

$$P_s = \frac{\exp\left(34.494 - \frac{4924.99}{t+237.1}\right)}{(t+105)^{1.57}} \quad (t > 0^\circ\text{C}). \quad (7.)$$

$$P_s = \frac{\exp\left(43.494 - \frac{6545.8}{t+278}\right)}{(t+868)^2} \quad (t \leq 0^\circ\text{C}). \quad (8.)$$

ahol t a vízfelszínen mért hőmérséklet.

A vízszint változásának monitorozását Microsensor MPM4710[0~1mH₂O]R4-G típusú víznyomás-mérő eszközzel végeztem, a légköri nyomáskiegyenlítő csővel ellátott készülék programozható, automata adatrögzítést tesz lehetővé. A maximális mérési hibája 1 mm, az eszköz felbontása 0,1 mm. A szenzor stabil, elmozdulás-mentes telepítésére a tómederbe beütött speciális állvány segítségével került sor, az aljzattól 10 cm-es távolságra. A telepítés helyét úgy határoztam meg, hogy a vízoszlop magassága a szenzor fölött várhatóan 30–100 cm-es intervallumban legyen. Az eszköz által rögzített víznyomás adatok mértékegysége a mmH₂O.



9. ábra. Meteorológiai mérések a Szent Anna-tónál

A meteorológiai adatok gyűjtését Renkforce WH2315 típusú meteorológiai állomás segítségével végeztem, levegő-hőmérséklet (pontosság ± 1 °C, felbontás 0,1 °C), relatív páratartalom (pontosság $\pm 5\%$, felbontás 1%), légnyomás (pontosság ± 3 hPa, felbontás 0,1 hPa), szélsebesség (pontosság ± 1 m/s ha a szélsebesség kisebb, mint 5 m/s, $\pm 10\%$ ha a szélsebesség 5 m/s vagy ezt meghaladó sebességű), szélirány és csapadékmennyiség (billenőedényes, pontosság $\pm 10\%$, felbontás 0,3 mm) mérések rögzítésével (9. ábra). A meteorológiai állomás elhelyezése a vízfelszín fölött, a parttól körülbelül 3 m távolságra történt, a szenzorok vízfelszínhez viszonyított 1 és 1,5 méter (a vízszint függvényében változó) magasságban kerültek elhelyezésre. A csapadékmérés esetében két csapadékgyűjtő edény is elhelyezésre került a mérések nagyobb biztonsága, illetve a szilárd csapadékok mérése érdekében.

A vízfelszín hőmérsékletének a mérése Hobo Pendant MX2201 típusú adatrögzítővel ellátott hőmérővel történt (pontosság $\pm 0,5$ °C, felbontás 0,04 °C), amely a tó középponti részén rögzített bolyához volt kikötve. A szenzor a vízfelszín alatt 5 mm mélységben volt elhelyezve egy fehér színű polisztirol lapból készített úszó aljára rögzítve, ez biztosította a mérési mélység megtartását és a direkt napsugárzás hatására történő melegedésének a kizárását (Szmolka és Frank, 2022b).

3.3.3. A vízmérleg komponenseinek vizsgálata során alkalmazott statisztikai módszer

A többváltozós lineáris regresszió statisztikai módszerét alkalmaztam a csapadék (CS) és a párolgás (P) független változóknak a tó víztározásában bekövetkező változásnak (ΔS), mint függő

változónak, a Szent Anna-tó vízmérleg modelljében (4.) értelmezhető prediktív képességének a becslésére. A módszer alkalmazásával a függő változó a független változók additív asszociációinak az eredményeként fejezhető ki:

$$y = a_0 + \sum_{i=1}^k a_i x_i + \varepsilon \quad (9.)$$

ahol y a függő változó, a_i a regressziós paraméterek, x_i független változók, ε a regresszió hibája.

A többváltozós lineáris regressziós modellt a Szent Anna-tó vízmérlegének csapadék és párolgás komponenseire a következőképpen lehet felírni:

$$\Delta S = a_0 + a_1 CS + a_2 P + \varepsilon \quad (10.)$$

Tekintettel arra, hogy a felszíni hozzáfolyás (H), a felszín alatti hozzáfolyás (H_a) és a mélységi elszivárgás (SZ) vízmérleg komponensek mérése nem megoldható, ezen komponensek kumulatív hatását részben a (10.) egyenlet a_0 szabad tagja, illetve részben a variancia csapadék (CS) és a párolgás (P) által nem magyarázott része képezi.

A nagy felbontású (10 percenként történő adatleolvasás és rögzítés) adatgyűjtés a 2020. március 23. és 2021. október 28. közti periódusban volt végezve. A terepi környezeti szélsőségek miatt a szenzorok működését érintő meghibásodások (elektromos alkatrészek átázása, áramforrás meghibásodások, állatok okozta szenzorhibák) a legalább egy szenzor meghibásodása miatt használhatatlan adatsorokkal jellemezhető időszakokat a feldolgozás során nem használtam fel. Összesen 412 naptári nap csapadék, párolgás és vízszintváltozás adatsorait dolgoztam fel a víztározás változásainak a csapadéktól és a párolgástól való függésének becslésére a többváltozós lineáris regresszió módszerével. A vízszint-mérések esetében a tó hullámzásának az egyes mérésekre gyakorolt hatása következtében fellépő mérési hibák mérséklése a mérések átlagolásával (10 mérés átlaga) lett végezve. A 10 perces időközzel rögzített adatsorok napi szinten lettek összegezve a feldolgozáshoz (Szmolka és Frank, 2022b). A számításokhoz Statistica 13.5.0.17 szoftvercsomagot (Tibco Software Inc. 2018) használtam. A választott megbízhatósági intervallum 95%.

3.4. A szabad víz megjelenésének vizsgálata a talajban különböző faállományok alatt

3.4.1. A szabad víz megjelenését vizsgáló kutatás célja

A tó vízszintjének megtartása érdekében a vízmérleg tápláló paramétereinek kutatása időszerű, ezek megismerése és javítása által adódhat lehetőség a nem kívánt folyamatok megállítására, megfordítására. Az éves csapadékmennyiségek alakítása nem lehetséges, ezért ennek a hatékonyabb felhasználása lehet a megoldás a felszín alatti hozzáfolyás mértékének a növelésével. A felszín alatti hozzászivárgás lehetősége az egyes állományok alatt a talajnedvesség dinamikájának a vizsgálata, a talajnedvesség szabadföldi vízkapacitást meghaladó értékeinek az előfordulása által igazolható vagy cáfolható.

A szabadföldi vízkapacitás az a vízmennyiség, amit a talaj beázás után, a gravitációval szemben, természetes környezetben vissza tud tartani. Szabad víz csak a kapilláris pórusok telítődése után jelenik meg a talajban. A kapilláris-gravitációs víz a 10-50 μm átmérőjű, durvább pórusokban jelenik meg, ahol a kapilláris szívóerő értéke kisebb, mint a gravitációs erő, így ezekben a víz lassan lefelé áramlik. A gravitációs víz az 50 μm -nél nagyobb pórusokban gyorsan szivárog lefelé és vagy eléri a talajvizet és növeli annak mennyiségét, vagy a szárazabb altalaj viszatartja (Stefanovits et al., 2010). A szabad víz formái közül a kráter meredek lejtői esetében a kapilláris-gravitációs víz és a gravitációs víz megjelenése is feltételezhető.

A kutatás során a következő kérdésekre kerestem a választ:

- A Szent Anna-tó kráterének belső, a tó vízgyűjtő területét képező lejtőinek talajaiban a talajnedvesség meghaladja-e a szabadföldi vízkapacitás értékét, és megjelenik-e a szabad víz gravitációs formája?
- A gravitációs víz megjelenése, ennek gyakorisága azonos-e a különböző fafajösszetelű és szerkezetű erdőállományok alatt?

A kutatás során az egyes állományok esetében megjelenő eltérések irányadóak lehetnek olyan erdőművelési beavatkozások elvégzésére, amelyek által a felszín alatti hozzáfolyás mértéke befolyásolható (Szmolka és Frank, 2022c).

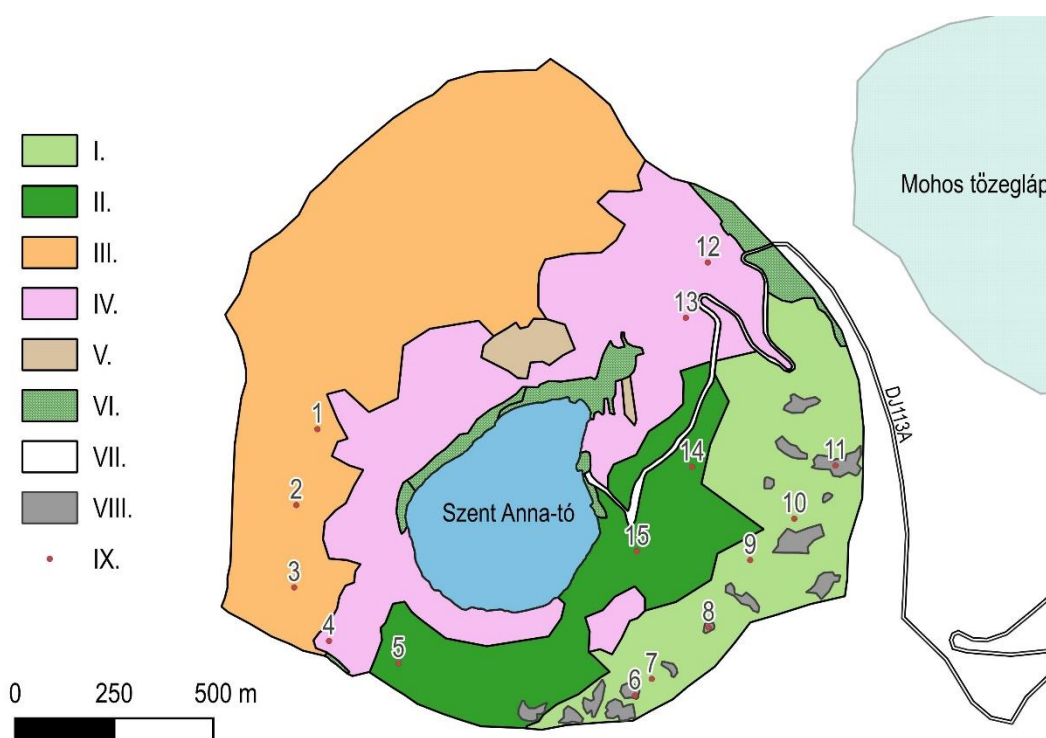
A talaj nedvességtartalma és a talajt borító faállomány jellemzői közötti összefüggések több vizsgálatnak is tárgyát képezték. Michigani *Acer saccharum* állományok vizsgálata során összefüggéseket mutattak ki a talaj nedvességtartalmának dinamikája és a levélfelületi index, valamint a záródás közt (Yuteng et al., 2014). Mexikói *Quercus hypoleucoides*, *Quercus grisea* és *Pinus engelmannii* elegyes állományokban végzett különböző intenzitású (közepes-40%,

erős-80%, kontroll-0%) záródásbontások során a kis mennyiségű (< 10 mm) csapadékesemények esetében mutattak ki jelentős eltérést a napi talajnedvesség maximális és átlagértékeinek növekedésében, különösen az erős intenzitású gyéritéssel érintett területeken, ugyanakkor a gyéritett mintaterületek esetében a nedvesség magasabb értékei hosszabb ideig fennálltak (Rascón-Ramos et al., 2021).

3.4.2. A szabad víz megjelenésének vizsgálati módszere

3.4.2.1. A mintaterületek kiválasztása

A kutatás során az állományfelmérés mintaterületeiben, különböző fafajösszetételű és korszerkezetű állományokban (idős bükkös, középkorú bükkös, középkorú lucos, vegyeskorú bükkös)



10. ábra. A szabad víz megjelenési gyakoriságának mérési pontjai a Szent Anna-tó kráterében (I. idős egykorú bükkös, II. vegyeskorú bükkös luc és jegenyefenyő elegyedésével, III. középkorú bükkös, IV. középkorú lucos, V. fiatal bükk-fenyő elegy, VI. gyepek, VII. aszfaltozott műút és parkoló, VIII. lék idős bükkösben, IX. mintavételi hely)

és egy idős bükk állományban képzett lékekben volt a szabad, gravitációs víz megjelenési gyakoriságára vonatkozó összehasonlító vizsgálat elvégezve (10. ábra).

A középkorú bükkösben az állományfelvételezés 1., 2. és 3. sorszámú mintaterületein, az idős bükkösben a 7., 9. és 10. sorszámú mintaterületeken, a vegyeskorú bükkösben az 5., 14. és 15. sorszámú mintaterületeken, az idős bükk állományban képzett lékekben a 6., 8. és 11. mintavételi helyeken történt a mérés.

3.4.2.2. A szabad víz megjelenéseinek kimutatása

Minden mintaterület esetében telepítésre került egy YL-69 típusú talajnedvesség szenzor a hozzá tartozó Arduino platformra épített adatrögzítővel (11. ábra), amelyek 10 perces időközönként rögzítették a talajnedvességet 50 centiméteres mélységben. Ez a mélység minden esetben a gyökérszóna alatt helyezkedett el, amelynek a vastagsága minden mintapont esetében 25 és 35 cm közötti volt. A kétágú villa alakú szenzorok elhelyezése a talajban ásott talajszelvény hegy felőli, nem bolygatott oldalába történő beszúrással történt, majd a gödör visszatemetése során az eredeti szinteknek megfelelően lett a kiásott anyag visszahelyezve, lehetőség szerint elkerülve a különböző talajszintekből származó talaj keveredését.



11. ábra. Talajnedvesség adatrögzítője a Szent Anna-tónál

Az YL-69 típusú talajnedvesség-szenzorok a rezisztivitás elvén működnek, ami a talajnak az elektromos árammal szembeni ellenállási képességét fejezi ki. A talajba irányított egyenáram feszültsége szorosan összefügg a talaj rezisztívásával. A rezisztívitas csökken a talaj nedvességtartalmának növekedésével (Weng et al., 2018). A szenzorok nagyon pontos kalibrálása a helyszínről a szenzorok kiemelése során gyűjtött talajminták esetében nem volt lehetséges, mivel a magas homoktartalom miatt gyakorlatilag lehetetlen volt bolygatatlan (nem széteső) mintát venni a szenzorok közvetlen közelében. A kalibrációt ezért a szabadföldi vízkapacitásnak megfelelő nedvességtartalom közelítő meghatározása által végeztem. A kalibrációhoz a talajnedvesség-szenzor kiemelésekor az ezt körülvevő talajból vett talajmintákat áteresztő aljú

edénybe helyeztem, meghatároztam a minta tömegét, tömörítettem, majd desztillált víz hozzáadásával nedvesítettem, addig amíg az edény alján a gravitációs víz megjelent. A gravitációs víz távozása után a mintákat szárítószekrényben 105°C -on súlyállandóságig szárítottam. A gravitációs víz távozása után fennmaradt minta tömegéből a szárított minta tömegéhez viszonyítva a szabadföldi vízkapacitásnak megfelelő talajnedvességet (tömeg %-ban) meghatároztam. Az ilyen módon meghatározott, a szabadföldi vízkapacitásnak megfelelő talajnedvességtartalom 27–35% között mozgott.

Az YL-69 talajnedvesség szenzor $0\text{--}1023\ \Omega$ értékű jelet bocsát ki. Az egyes szenzorok kalibrációja során elsőfokú (lineáris) függvény illesztését végeztem a talajnedvesség és a szenzorok által rögzített értékek közötti kapcsolat leírásához. A száraz talajmintának megfelelő rezisztivitás érték és a szenzorok adatsoraiból grafikusán meghatározott, a szabadföldi vízkapacitásnak megfelelő érték leolvasása után a kalibrálást a két értékpárra fektetett egyenes egyenleteként értelmeztem.

Az adatrögzítők adataiból az egyes állományok alatt a talajnedvesség alakulása jól követhető, az esőzések alkalmával megjelenő szabadföldi vízkapacitást (amely a felszín alatti beszivárgás feltétele) meghaladó talajnedvességgel jellemezhető időszakok könnyen azonosíthatók. A szabad víz megjelenése a talajnedvesség görbén a csapadékos időszakokban a talajnedvesség értékének hirtelen növekedése és a csapadék megszűnését követő időszakban a gyors gravitációs beszivárgás következtében ennek meredek visszaesése alapján felismerhető. Csak a grafikusán jól kivehető, hegyes csúccsal jellemezhető, egyértelműen szabad vizet jelölő időpontok lettek azonosítva a megjelenési gyakoriságok elemzéséhez (Szmolka és Frank, 2022c).

Az adatrögzítés a 2020. május 1. és 2021. december 31. közötti időszakban történt, az adatok elemzése és kiértékelése azonban csak a 2020. május 1. és 2021. augusztus 1. időszakra lett elvégezve, az ezutáni időszakban történt adatvesztések miatt, amit több adatrögzítő meghibásodása okozott.

3.4.2.3. A csapadékmennyiségek mérése

A csapadékmennyiség időbeni alakulása a Szent Anna-tónál a vízmérleg-komponenseinek meghatározása érdekében telepített Renkforce WH2315 típusú meteorológiai állomás adatainak felhasználásával történt. A billenőedényes csapadékmérővel felszerelt meteorológiai állomás adatai egyszerű, csapadékgyűjtő edénnyel ellátott pluviométerrel is ellenőrzésre és kiegészítésre kerültek a téli időszakban, amikor a fagypont alatti hőmérsékletek és a szilárd csapadékformák mérése a billenőedényes rendszerrel nem működhetett megfelelően.

3.4.3. A szabad víz megjelenésének vizsgálata során alkalmazott statisztikai módszerek

Az egyes erdőszervezetek alatti, a szabad víz megjelenési gyakoriságában megjelenő különbségek statisztikai kiértékelését X^2 próbával végeztem. Az értékeléshez az egyes szenzorok mérési eredményeiből a csapadékos időszakokban a szabad víz megjelenési gyakoriságait számoltam össze. Minden olyan csapadékos időszakot, vagy hóolvadással összefüggő talajnedvesség növekedést, amelynek esetében legalább egy szenzor szabad víz megjelenését regisztrálta, mintavételi időpontnak tekintettem és minden szenzornál értékeltem az adott időszakra a szabad víz jelenlétét vagy hiányát. Az azonos állományszerkezettel jellemezhető kategóriák (idős bükkös, középkorú bükkös, középkorú lucos, vegyeskorú bükkös) három-három mintaterületének homogenitását a szabad víz megjelenési gyakoriságának szempontjából X^2 homogenitásvizsgálattal ellenőriztem. A szabad víz kategóriákként összesített megjelenési gyakoriságainak az egyes kategóriáktól való függőségét X^2 függetlenségvizsgálattal ellenőriztem. Bonferroni post-hoc tesztet alkalmaztam a páronkénti összehasonlítások elvégzéséhez (Szmolka és Frank, 2022c). A kiértékeléshez Statistica 13.5.0.17 szoftvercsomagot használtam. A választott szignifikanciaszint 5%.

4. EREDMÉNYEK ISMERTETÉSE ÉS ÉRTÉKELÉSE

4.1. Állományszerkezetek vizsgálati eredményeinek ismertetése és értékelése

4.1.1. Állományfelmérések eredményei

4.1.1.1. Középkorú bükkösök

A középkorú bükkösben az állományfelmérések az 1., 2. és 3. sorszámú mintaterületeken, a hatályos üzemterv szerinti 35B erdőrészletben (5. ábra) történtek a szabad víz megjelenésének vizsgálata érdekében végzett talajnedvesség-mérések helyszínein. A felvételezett mintaterületeken az állomány 65 éves, a kitettség keleti (1. és 2. mintaterület) és északkeleti (3. mintaterület). A lejtés 30°-os az 1. és 3. és 36°-os a 2. számú mintaterület esetében. Az állományok egykorúak, a bükk mellett kevés számú bibircses nyír, rezgő nyár, korai juhar és hegyi juhar, hegyi szil, lucfenyő, jegenyefenyő jelenik meg az állományban. Az újulat-szint és a cserjeszint hiányzik, az avartakaró folytonos. A vizsgált állományban az üzemtervi nyilvántartások szerint a 2007–2016 időszakban egyszer volt nevelővágás (gyérítés) végezve, gyenge (3%) beavatkozási eréllyel. A mintaterületek perspektivikus, felülnézeti és oldalnézeti faállomány-reprezentációját az 1. melléklet tartalmazza. A főbb állományszerkezeti jellemzőket az alábbi táblázatban mutatom be (1. táblázat).

1. táblázat. Elegyarány, hektáronkénti törzsszám, átlagos törzstávolság, folyónövedék, fatermési osztály a középkorú bükkös mintaterületeken

Minta-terület	Faegyed (db)	Elegyarány körlapösszeg szerint (%)*	Záródás (%)	Törzsszám (db/ha)	Átlagos törzstávolság (m)	Fatermési osztály**	Folyónövedék (m ³ év ⁻¹ ha ⁻¹)
1.	84	B 83, LF 5, NYI 5, RNY 4, JF 1, HSZ 2	100	1680	2,6	II.	11,4
2.	107	B 88, NYI 10, KJ 1, HJ 1	100	2140	2,3	III.	9,4
3.	74	B 90, HJ 6, NYI 3, LF 1	100	1480	2,8	III.	9,4
Átlag	88	B 87, LF 5, NYI 3, RNY 2, HSZ 1 HJ 2, (JF, KJ)	100	1767	2,6	II./III.	10,1

* LF: lucfenyő, JF: jegenyefenyő, B: bükk, HSZ: hegyi szil, NYI: bibircses nyír, RNY: rezgő nyár, KJ: korai juhar, HJ: hegyi juhar

** romániai relatív fatermési osztályozási rendszer

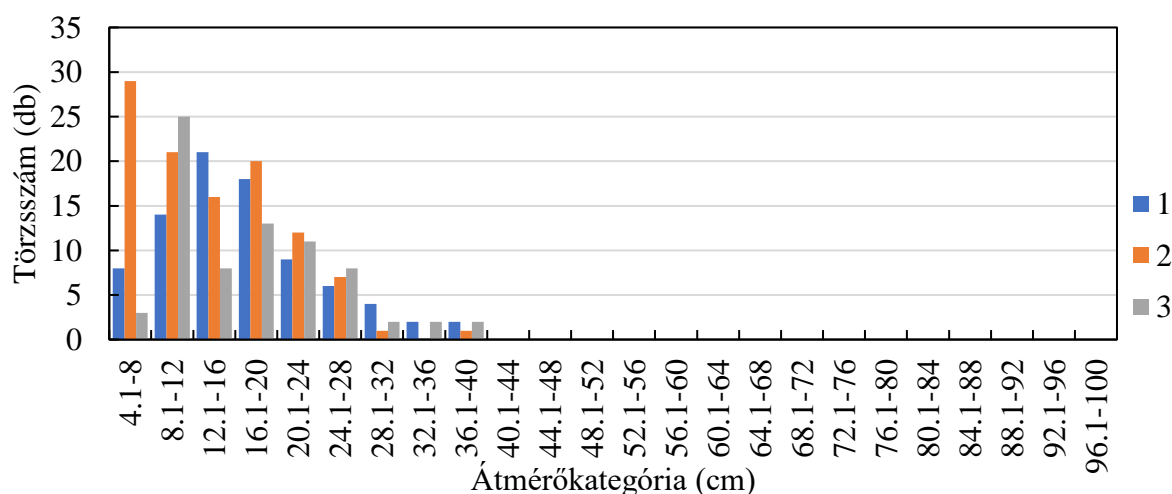
A körlapösszegeket és a mellmagassági átlagátmérőket a középkorú bükkös mintaterületek esetében az alábbi táblázat mutatja (2. táblázat).

2. táblázat. A mellmagassági átmérő és a körlapösszeg; az aritmetikai átlagátmérő statisztikai mutatói a középkorú bükkös mintaterületeken

Minta-terület	Faegyed (db)	Körlap-összeg (m ² /ha)	Átlag-átmérő* (cm)	Aritmetikai átlagátmérő (cm)	Minimum (cm)	Maximum (cm)	Szórás (cm)
1.	84	48,2	19,1	17,6	6	39	7,4
2.	107	41,7	15,8	14,2	5	38	6,8
3.	74	44,3	19,5	17,8	5	40	8,1
Átlag	88	44,7	18,1	16,5	5,3	39,0	7,4

* az átlagos körleaphoz tartozó átmérő

A törzsszámok átmérő szerinti eloszlásai a 12. ábrán láthatók. A mintaterületek az egykorú állományokra jellemző törzsszámeloszlást mutatnak.



12. ábra. A törzsszám átmérő szerinti eloszlása középkorú bükkös mintaterületeken. (Jelmagyarázat: mintaterület sorszáma)

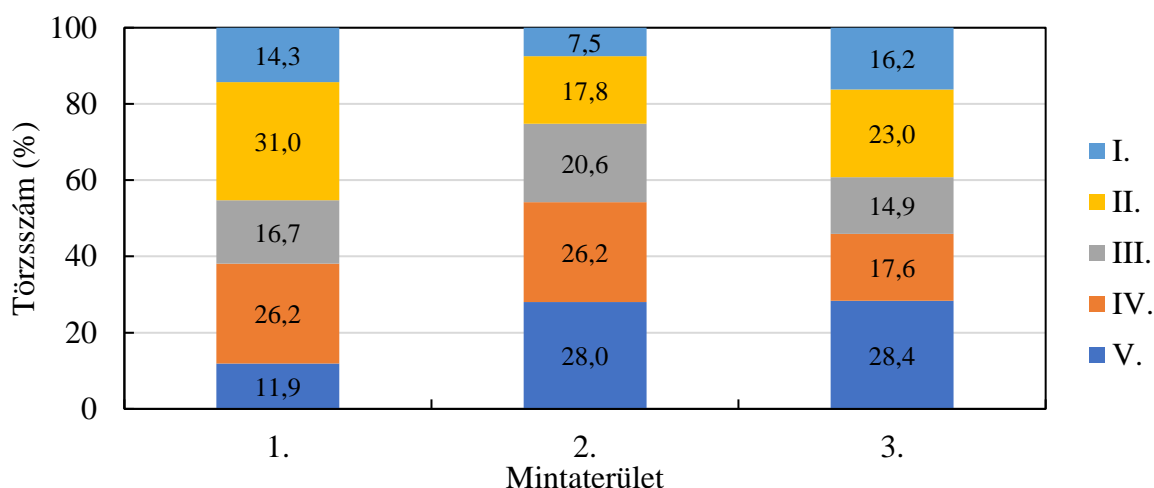
A famagasság statisztikai mutatóit és a biológiai felsőmagasság értékeit a középkorú bükkös mintaterületek esetében az alábbi táblázat mutatja (3. táblázat).

3. táblázat. A famagasság statisztikai mutatói a középkorú bükkös mintaterületeken; biológiai felsőmagasság

Minta-terület	Fa-egyed (db)	Aritmetikai átlagmagasság (m)	Minimum (m)	Maximum (m)	Szórás (m)	Biológiai felsőmagasság (%)
1.	84	20,2	8,0	30,6	5,0	25,2
2.	107	17,6	5,4	28,6	6,0	23,7
3.	74	19,1	6,6	29,5	6,0	27,1
Átlag	88	19,0	6,6	29,6	5,7	25,3

A famagasság tekintetében figyelemreméltó az aritmetikai átlagmagasság nagy szórása, az aritmetikai átlagmagasság a biológiai felsőmagasság 70–80%-a az egyes mintaterületekben.

A koronarészarány és a koronakezdet-magasság statisztikai mutatói a 2. és 3. mellékletekben találhatóak. A faegyedek magassági elhelyezkedését tükröző Kraft-féle osztályozás szerinti törzsszám-arányok az egyes mintaterületek esetében a 13. ábrán láthatók, a középkorú bükkös esetében a faegyedek aránylag egyenletesen oszlanak meg az egyes osztályok között.



13. ábra. A faegyedek Kraft-féle osztályozás szerinti eloszlása középkorú bükkös mintaterületeken. (Jelmagyarázat: I. kimagasló, II. uralkodó, III. elmaradó, IV. túlszárnyalt, V. elnyomott)

Az átlagfa statisztikai mutatóit és a hektáronkénti fatérfogatot a középkorú bükkös mintaterületek esetében az alábbi táblázat tartalmazza (4. táblázat). Az átlagfa térfogata viszonylag alacsony ($0,212\text{--}0,343\text{ m}^3$), azonban a magas törzsszám miatt a fatérfogat a közepes termőképességű bükkösöknek megfelelő értékű. Az átlagfa szórásának és az átlagfa értékének arányát kifejező relatív szórás 94–110% közti értéket mutat.

4. táblázat. Az átlagfa statisztikai mutatói középkorú bükkös mintaterületeken; hektáronkénti fatérfogat

Mintaterület	Faegyed (db)	Átlagfa (m^3)	Minimum (m^3)	Maximum (m^3)	Szórás (m^3)	Fatérfogat (m^3/ha)
1.	84	0,325	0,013	1,515	0,307	546
2.	107	0,212	0,006	1,622	0,235	453
3.	74	0,343	0,011	1,815	0,369	507
Átlag	88	0,293	0,010	1,651	0,304	502

4.1.1.2. Idős bükkösök

Az idős bükkös faállomány-kategória esetében az érintett erdőrészek a hatályos üzemterv szerinti 33D (9. és 10. mintaterület) és a 34A részletek (7. mintaterület), a mintaterületek egybeesnek a talajnedvesség-mérések helyszíneivel (5. ábra). A talajinfiltráció mérések az idős bükkösök esetében ezeken a mintaterületeken, illetve néhány esetben ezek közelében, meggyező állományszerkezet alatt történtek. Az átlagéletkor 130 év, a mintaterületek kitettsége északnyugati, terep lejtése 18° (7., 10. mintaterület) és 22° (9. mintaterület) közt változik. Az állományt csak bükk alkotja, mageredetű, egykorú, egyszintű állományszerkezet jellemzi, folytonos avartakaróval. Az újulat-szint és a cserjeszint hiányzik. Az üzemtervi nyilvántartások szerint az állományban a 2007–2016 időszakban egészségügyi fakitermelés és konzerválóság típusú beavatkozások voltak végezve. A mintaterületek perspektivikus, felülnézeti és oldalnézeti faállomány-reprezentációját az 1. melléklet tartalmazza. A főbb állományszerkezeti jellemzőket az alábbi táblázatban mutatom be (5. táblázat).

5. táblázat. Elegyarány, hektáronkénti törzsszám, átlagos törzstávolság, folyónövedék, fatermési osztály idős bükkös mintaterületeken

Minta-terület	Faegyed (db)	Elegyarány körlapösszeg szerint (%)*	Záródás (%)	Törzsszám (db/ha)	Átlagos törzstávolság (m)	Fatermési osztály**	Folyónövedék (m ³ év ⁻¹ ha ⁻¹)
9.	26	B 100	95	260	6,7	II.	8,6
10.	44	B 100	100	440	5,1	II.	8,6
7.	38	B 100	100	380	5,5	II.	8,6
Átlag	36	B 100	98	360	5,8	II.	8,6

*B -bükk

** romániai relatív fatermési osztályozási rendszer

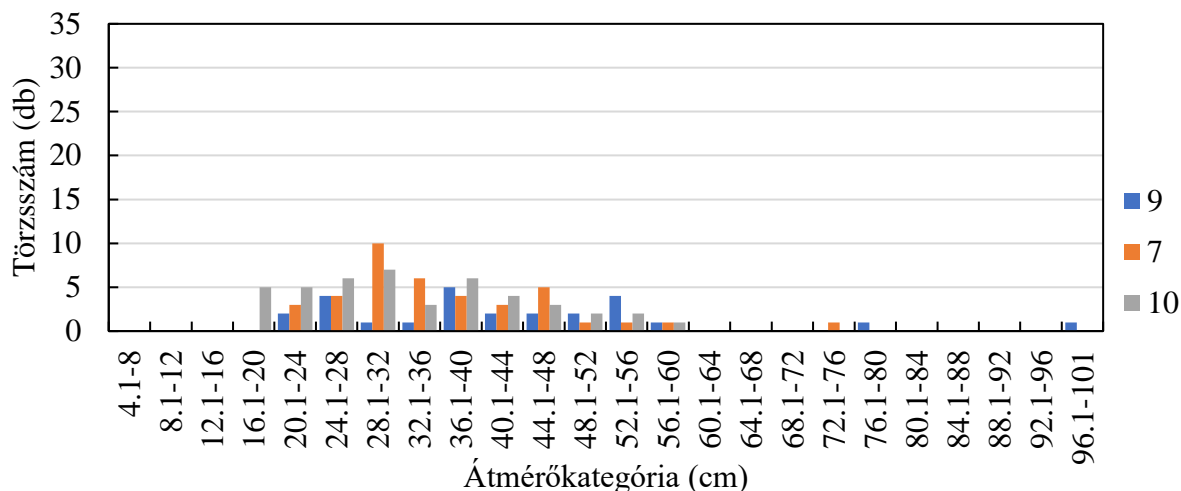
A körlapösszegeket és a mellmagassági átlagátmérőket az idős bükkös mintaterületek esetében az alábbi táblázat mutatja (6. táblázat).

6. táblázat. A mellmagassági átmérő és a körlapösszeg; az aritmetikai átlagátmérő statisztikai mutatói az idős bükkös mintaterületeken

Minta-terület	Faegyed (db)	Körlapösszeg (m ² /ha)	Átlagátmérő* (cm)	Aritmetikai átlagátmérő (cm)	Minimum (cm)	Maximum (cm)	Szórás (cm)
9.	26	45,7	47,3	44,1	21	101	17,6
10.	44	43,1	35,3	33,6	17	60	10,9
7.	38	41,3	37,2	36,1	22	58	9,0
Átlag	36	43,4	39,9	37,9	20,0	73,0	12,5

* az átlagos körlaphoz tartozó átmérő

A törzsszámok átmérő szerinti eloszlásai a 14. ábrán láthatók, az ábra az egykorú állományokra jellemző törzsszámeloszlásokat mutat.



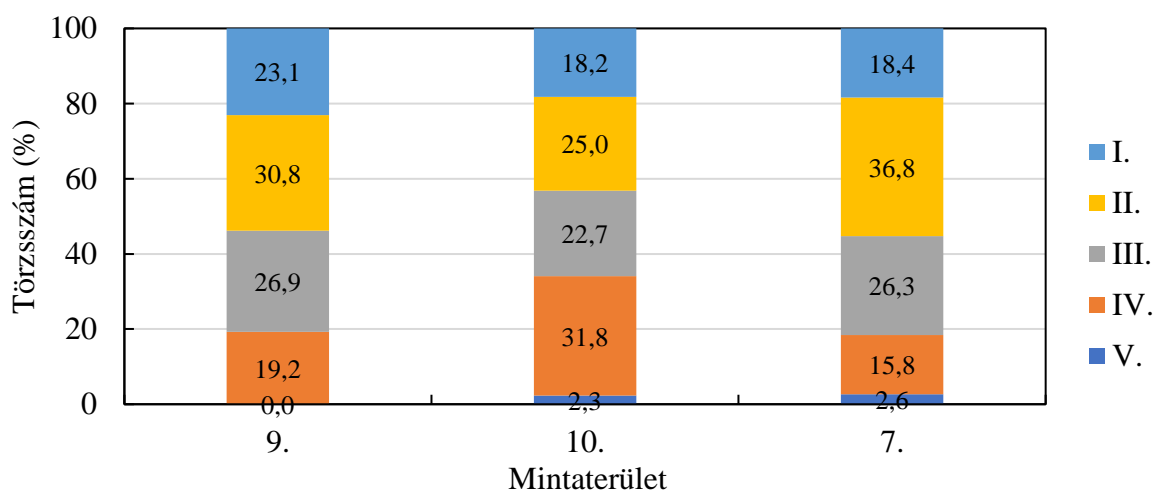
14. ábra. A törzsszám átmérő szerinti eloszlása idős egykorú bükkös mintaterületeken. (Jelmagyarázat: mintaterület sorszáma)

A fmagasság statisztikai mutatóit és a biológiai felsőmagasság értékeit az idős bükkös mintaterületek esetében az alábbi táblázat mutatja (7. táblázat). Magas aritmetikai átlagmagasság jellemzi a mintaterületek faegyedeit, a szórás még a nagyobb magasság mellett is kisebb, mint a középkorú bükkösök esetében, az aritmetikai átlagmagasság sem sokkal kisebb, mint a biológiai felsőmagasság, ennek 86–91%-a az egyes mintaterületeken.

7. táblázat. A fmagasság statisztikai mutatói az idős bükkös mintaterületeken; biológiai felsőmagasság

Minta-terület	Fa-egyed (db)	Aritmetikai átlagmagasság (m)	Minimum (m)	Maximum (m)	Szórás (m)	Biológiai felsőmagasság (m)
9.	26	31,9	24,8	36,2	3,5	34,9
10.	44	30,0	20,8	36,6	4,5	34,8
7.	38	32,0	23,0	37,4	3,5	35,2
Átlag	36	31,3	22,9	36,7	3,8	35,0

A koronarésarány és a koronakezdet-magasság statisztikai mutatói a 2. és a 3. mellékletekben találhatóak. A faegyedek magassági elhelyezkedését tükröző Kraft-féle osztályozás szerinti törzsszám-arányok az egyes mintaterületek esetében a 15. ábrán láthatók. A kimagasló és uralkodó osztályok nagyobb részaránya jellemző, ugyanakkor az V., elnyomott Kraft-osztályba sorolható egyedek szinte teljesen hiányoznak.



15. ábra. A faegyedek Kraft-féle osztályozás szerinti eloszlása idős bükkös mintaterületeken. (Jelmagyarázat: I. kimagasló, II. uralkodó, III. elmaradó, IV. túlszárnyalt, V. elnyomott)

Az átlagfa statisztikai mutatóit és a hektáronkénti fatérfogatot az idős bükkös mintaterületek esetében az alábbi táblázat tartalmazza (8. táblázat). A hektáronkénti fatérfogat értékei magasak, a II. fatermési osztálynak (romániai relatív fatermési osztályozás) megfelelő, a közepes fatermőképesség felső határához közelítő értékek. Az átlagfa értékei magasak, a relatív szórás 60–99% közötti.

8. táblázat. Az átlagfa statisztikai mutatói idős bükkös mintaterületeken; hektáronkénti fatérfogat

Mintaterület	Faegyed (db)	Átlagfa (m ³)	Minimum (m ³)	Maximum (m ³)	Szórás (m ³)	Fatérfogat (m ³ /ha)
9.	26	3,060	0,441	15,075	3,041	796
10.	44	1,595	0,246	5,228	1,209	702
7.	38	1,830	0,474	5,031	1,090	695
Átlag	36	2,162	0,387	8,445	1,780	731

4.1.1.3. Vegyeskorú bükkösök

A vegyeskorú bükkös állományszerkezet a 33D és 34A erdőrészetek alsó részére jellemző, az állományszerkezet felmérését 34A részletben az 5., a 33D részletben a 14. és 15. sorszámú mintaterületeken végeztem a szabad víz megjelenésének vizsgálatához végzett talajnedvességmérések helyszínein (5. ábra). Az 5. mintaterület kitétsége északnyugati, a lejtése 31°, a 14. és 15. mintaterületek nyugati kitétségűek 21°-os illetve 18°-os lejtéssel jellemezhetők. A felvételzett állomány mageredetű, vegyeskorú állomány, a bükk mellett a lucfenyő és a jegenyefenyő fordul elő az állomány fafajösszetételében. Az újulati szintet a 5. mintaterület esetében néhány

elszórta elhelyezkedő 0,3–0,5 m magas bükkcsemete képviseli, a 14. mintaterület esetében elszórta előforduló 0,5–1,5 m magas bükk (elegyarány 60%), 0,5–1,5 m magas luc (elegyarány 30%) és 0,5 m jegenyefenyő (elegyarány 10%) csemeték képezik. A 15. mintaterület területét 80%-ban 1–2 m magas bükk újulat borítja, elszórta 2–2,5 m magas lucfenyő egyedek találhatóak. Cserjefajok nem találhatók a vegyeskorú bükkös mintaterületeken, az avartakaró folytonos. Az üzemtervi nyilvántartások szerint az állományban a 2007–2016 időszakban egészségügyi fakitermelés és konzerválóság jelleggel voltak beavatkozások végezve. A mintaterületek perspektivikus, felülnézeti és oldalnézeti faállomány-reprezentációját az 1. melléklet tartalmazza.

A főbb állományszerkezeti jellemzőket az alábbi táblázatban mutatom be (9. táblázat).

9. táblázat. Elegyarány, hektáronkénti törzsszám, átlagos törzstávolság, folyónövedék, fatermési osztály vegyeskorú bükkös mintaterületeken

Minta-terület	Faegyed (db)	Elegyarány körlapösszeg szerint (%)*	Záródás (%)	Törzsszám (db/ha)	Átlagos törzstávolság (m)	Fatermési osztály**	Folyónövedék (m ³ év ⁻¹ ha ⁻¹)
5.	35	B 100	90	350	5,7	II.	-
15.	28	B 79, LF 21	90	280	6,4	III.	-
14.	26	B 84, LF 15, JF 1	90	260	6,7	II.	-
Átlag	30	B 87, LF 12, JF 1	90	297	6,3	II./III.	-

* LF: lucfenyő, JF: jegenyefenyő, B: bükk

** romániai relatív fatermési osztályozási rendszer

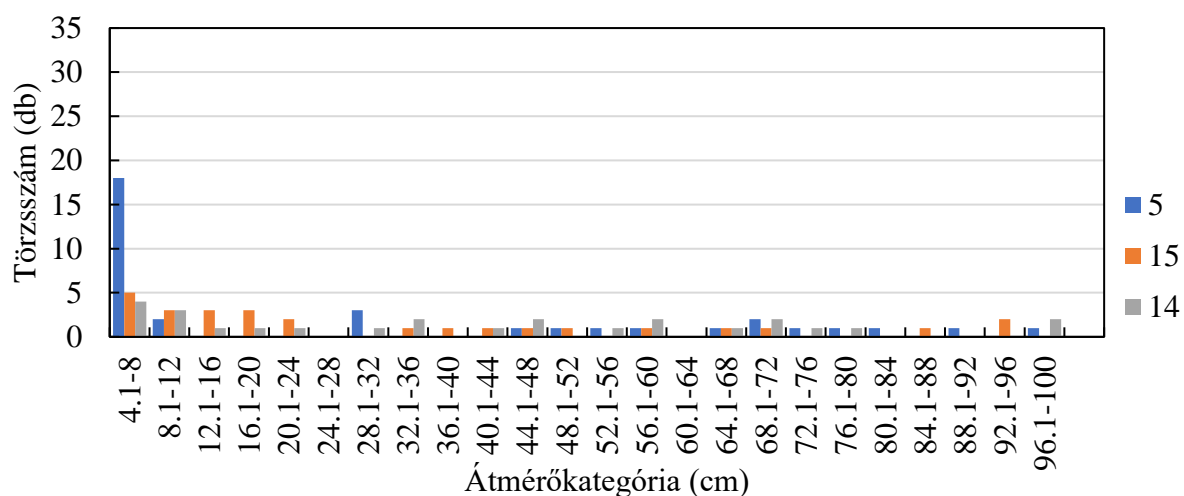
A körlapösszegeket és a mellmagassági átlagátmérőket a vegyeskorú bükkös mintaterületek esetében az alábbi táblázat mutatja (10. táblázat).

10. táblázat. A mellmagassági átmérő és a körlapösszeg; az aritmetikai átlagátmérő statisztikai mutatói a vegyeskorú bükkös mintaterületeken

Minta-terület	Faegyed (db)	Körlapösszeg (m ² /ha)	Átlagátmérő* (cm)	Aritmetikai átlagátmérő (cm)	Minimum (cm)	Maximum (cm)	Szórás (cm)
5.	35	52,0	43,5	30,6	6	99	31,9
15.	28	40,6	43,0	33,2	6	95	27,8
14.	26	51,6	50,3	41,2	6	98	29,3
Átlag	30	48,1	45,6	35,0	6,0	97,3	29,7

* az átlagos körlaphoz tartozó átmérő

A törzsszámok átmérő szerinti eloszlásai a 16. ábrán láthatók. Az eloszlások a vegyeskorú állományokra jellemző, folyamatosan csökkenő, széles átmérőspektrumot felvonultató lefutást mutatják.



16. ábra. A törzsszám átmérő szerinti eloszlása a vegyeskorú bükkös mintaterületeken. (Jelmagyarázat: mintaterület sorszáma)

A famagasság statisztikai mutatóit és a biológiai felsőmagasság értékeit a vegyeskorú bükkös mintaterületek esetében az alábbi táblázat mutatja (11. táblázat). Jelentős, a vizsgált állománykategóriák közül a legnagyobb szórás jellemzi a faegyedek magasság szerinti eloszlását, az aritmetikai átlagmagasság alacsony, a biológiai felsőmagassághoz viszonyítva az átlagok összehasonlításában ennek 47–65%-a.

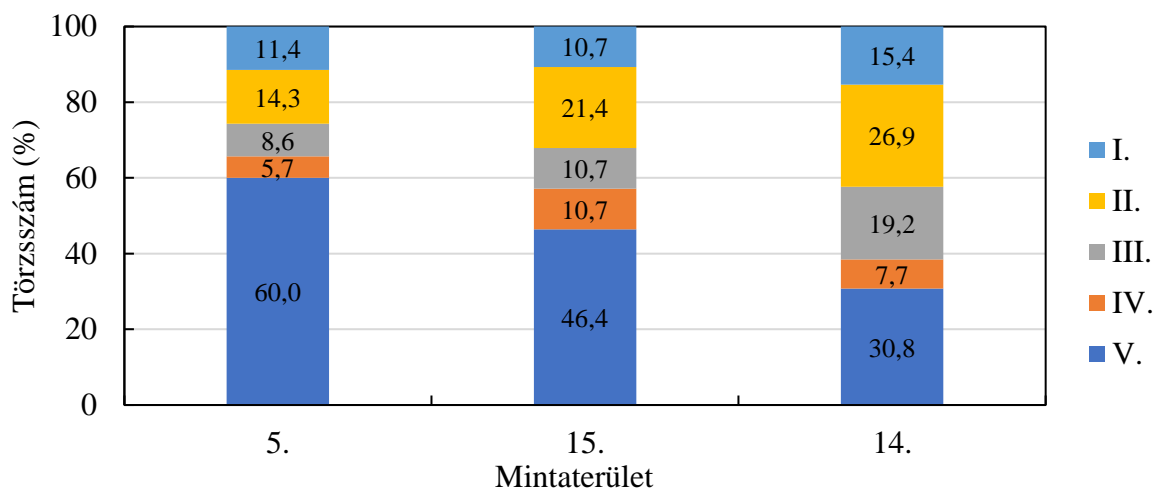
11. táblázat. A famagasság statisztikai mutatói a vegyeskorú bükkös mintaterületeken; biológiai felsőmagasság

Minta-terület	Fa-egyed (db)	Aritmetikai átlagmagasság (m)	Minimum (m)	Maximum (m)	Szórás (m)	Biológiai felsőmagasság (m)
5.	35	17,3	3,6	38,5	13,6	36,7
15.	28	18,1	4,0	33,2	11,2	32,7
14.	26	23,3	4,5	39,6	13,0	35,7
Átlag	30	19,6	4,0	37,1	12,6	35,0

A koronarészarány és a koronakezdet-magasság statisztikai mutatói a 2. és a 3. mellékletekben találhatóak.

A faegyedek magassági elhelyezkedését tükröző Kraft-féle osztályozás szerinti törzsszám-arányok az egyes mintaterületek esetében a 17. ábrán láthatók. Figyelemre méltó az elnyomott, V. Kraft osztályba sorolt fák magas aránya, amelyek az összes faegyed 30–60%-át teszik ki a

mintaterületekben. Ez az eloszlás a famagasságok jelentős szórása mellett a koronaterület jelentős kiterjedését mutatja.



17. ábra. A faegyedek Kraft-féle osztályozás szerinti eloszlása vegyeskorú bükkös mintaterületeken. (Jelmagyarázat: I. kimagasló, II. uralkodó, III. elmaradó, IV. túlszárnyalt, V. elnyomott)

Az átlagfa statisztikai mutatóit és a hektáronkénti fatérfogatot a vegyeskorú bükkös mintaterületek esetében az alábbi táblázat tartalmazza (12. táblázat). A legnagyobb átlagfatérfogattal jellemezhető mintaterületek a vizsgált állománykategóriák között, ugyanakkor a fatérfogatok szórása is jelentős, a relatív szórás 122–161%-os a vizsgált mintaterületekben.

12. táblázat. Az átlagfa statisztikai mutatói vegyeskorú bükkös mintaterületeken; hektáronkénti fatérfogat

Mintaterület	Faegyed (db)	Átlagfa (m ³)	Minimum (m ³)	Maximum (m ³)	Szórás (m ³)	Fatérfogat (m ³ /ha)
5.	35	2,790	0,007	15,323	4,421	977
15.	28	2,165	0,009	13,472	3,487	606
14.	26	3,398	0,007	14,724	4,167	883
Átlag	30	2,784	0,008	14,506	4,025	822

4.1.1.4. Középkorú lucosok

A középkorú lucosok esetében a 33C (13. mintaterület), 34C (4. mintaterület), 35C (16. és 17. mintaterület) és a 37 (12. mintaterület) erdőrészekben került felvételezésre az 5, egyenként 500 m²-es mintaterület, 60 és 65 év közötti, mesterséges felújításból származó egykorú állományokban (5. ábra), a talajnedvesség-mérések helyszínein. A talajinfiltráció mérések a középkorú lucosok esetében ezeken a mintaterületeken, illetve néhány esetben ezek közelében,

azonos állományszerkezettel jellemezhető helyeken történtek. A 13. mintaterület délnyugati kitétséggel és 18°-os lejtéssel, a 4. mintaterület északkeleti kitétséggel és 17°-os lejtéssel, a 12. mintaterület délnyugati kitétséggel és 19°-os lejtéssel jellemezhető. A 16. és 17. mintaterületek esetében a kitétség délkeleti, a lejtés 12°. Az állományok egyszintűek, a lucfenyő mellett a néhány jegenyefenyő, bükk, hegyi szil, bibircses nyír található a mintaterületeken. Az újulati szint és a cserjeszint hiányzik, az avartakaró folytonos. A középkorú lucosok a mesterséges felújításból származó monokultúrák képét mutatják, az üzemtervi nyilvántartások szerint a 2007–2016 időszakban a vizsgált állományokban egészségügyi fakitermelések történtek, részben az elszórta előforduló szél- és hőtörések felszámolása érdekében, ezeknek a fakitermeléseknek a hatásai teszik változatosabbá az állományképet. A mintaterületek perspektivikus, felülnézeti és oldalnézeti faállomány-reprezentációját az 1. melléklet tartalmazza. A főbb állományszerkezeti jellemzőket az alábbi táblázatban mutatom be (13. táblázat).

13. táblázat. Elegyarány, hektáronkénti törzsszám, átlagos törzstávolság, folyónövedék, fatermési osztály a középkorú lucos mintaterületeken

Minta-terület	Faegyed (db)	Elegyarány körlapösszeg szerint (%)*	Záródás (%)	Törzsszám (db/ha)	Átlagos törzstávolság (m)	Fatermési osztály**	Folyónövedék (m ³ év ⁻¹ ha ⁻¹)
13.	54	LF 100	100	1080	3,3	I.	18,3
4.	55	LF 95, B 4, HSZ 1	90	1100	3,2	I.	18,3
12.	106	LF 100	90	2120	2,3	II.	16,4
16.	39	LF 99, B 1	85	780	3,8	I.	18,3
17.	31	LF 84, JF 10, NYI 4, B 2	85	620	4,3	I.	18,3
Átlag	57	LF 96, JF 2, B 1, NYI 1, (HSZ)	90	1140	3,4	I./II.	17,8

* LF: lucfenyő, JF: jegenyefenyő, B: bükk, HSZ: hegyi szil, NYI: bibircses nyír

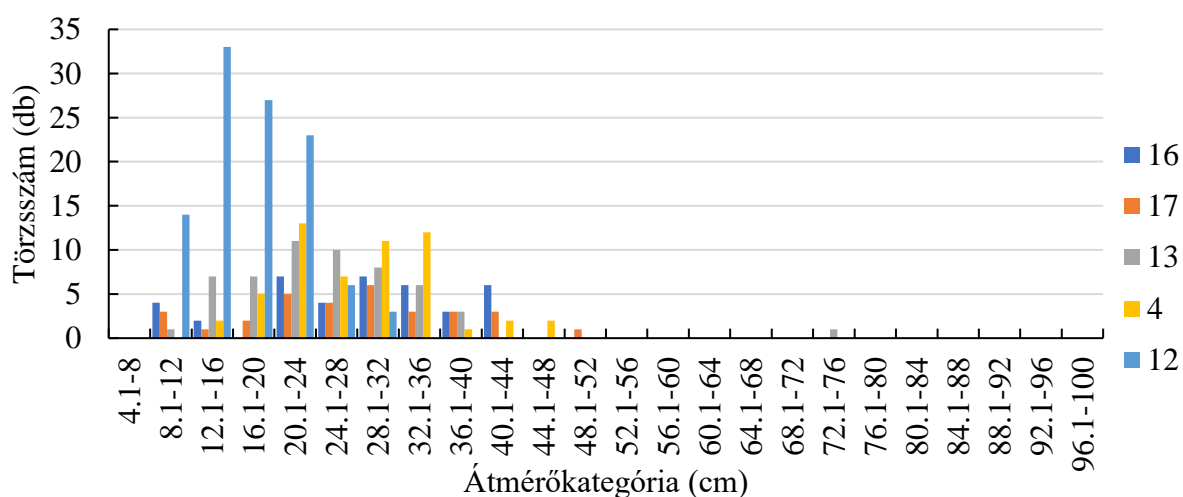
** romániai relatív fatermési osztályozási rendszer

A mellmagassági átlagátmérőket a középkorú lucos mintaterületek esetében az alábbi táblázat mutatja (14. táblázat). A törzsszámok átmérő szerinti eloszlásai a 18. ábrán láthatók. Az átmérőeloszlások az egykorú állományokra jellemző képet mutatják, az egyes mintaterületek közti eltérések az állományokban bekövetkezett korábbi károsodások (szél- és hőtörések, száradások) következtében jelennek meg.

14. táblázat. A mellmagassági átmérő és a körlapösszeg; az aritmetikai átlagátmérő statisztikai mutatói a középkorú lucos mintaterületeken

Minta-terület	Faegyed (db)	Körlap-összeg (m ² /ha)	Átlag-átmérő* (cm)	Aritmetikai átlagátmérő (cm)	Minimum (cm)	Maximum (cm)	Szórás (cm)
13.	54	64,8	27,6	25,9	12	74	9,7
4.	55	75,2	29,5	28,6	14	48	7,3
12.	106	56,9	18,5	17,9	10	31	4,7
16.	39	57,0	30,5	29,0	8	43	9,7
17.	31	43,1	29,8	27,8	9	49	10,6
Átlag	57	59,4	25,8	25,8	10,6	49,0	8,4

* az átlagos körlaphoz tartozó átmérő



18. ábra. A törzsszám átmérő szerinti eloszlása középkorú lucos mintaterületeken. (Jelmagyarázat: mintaterület sorszáma)

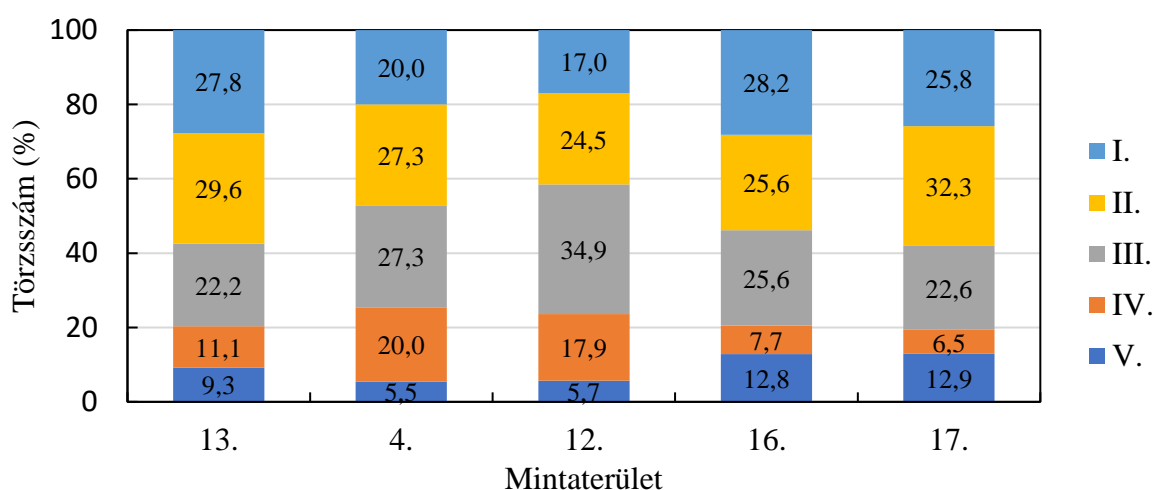
A fmagasság statisztikai mutatóit és a biológiai felsőmagasság értékeit a középkorú lucos mintaterületek esetében az alábbi táblázat mutatja (15. táblázat).

15. táblázat. A fmagasság statisztikai mutatói a középkorú lucos mintaterületeken; biológiai felsőmagasság

Minta-terület	Fa-egyed (db)	Aritmetikai átlagmagasság (m)	Minimum (m)	Maximum (m)	Szórás (m)	Biológiai felsőmagasság
13.	54	26,4	16,0	35,0	3,5	30,2
4.	55	28,6	16,5	35,2	4,7	33,9
12.	106	20,6	13,5	26,7	2,9	24,2
16.	39	26,2	11,0	33,2	6,7	31,3
17.	31	27,4	12,0	36,4	7,0	34,5
Átlag	57	25,8	13,8	33,3	4,96	30,82

Az aritmetikai átlagmagasság szórása az idős bükkösök esetében megfigyelt értékekhez hasonlítható, hasonló az aritmetikai átlagmagasság és a biológiai felsőmagasság viszonya is (78–87%) az egyes mintaterületekben. A koronarészarány és a koronakezdet-magasság statisztikai mutatói a 2. és 3. mellékletekben találhatóak.

A faegyedek magassági elhelyezkedését tükröző Kraft-féle osztályozás szerinti törzsszám-arányok az egyes mintaterületek esetében a 19. ábrán láthatók. A kimagasló és az uralkodó fák magas aránya jellemzi a faegyedek Kraft osztályok szerinti eloszlását.



19. ábra. A faegyedek Kraft-féle osztályozás szerinti eloszlása középkorú lucos mintaterületeken. (Jelmagyarázat: I. kimagasló, II. uralkodó, III. elmaradó, IV. túlszárnyalt, V. elnyomott)

Az átlagfa statisztikai mutatóit és a hektáronkénti fatérfogatot a középkorú lucos mintaterületek esetében az alábbi táblázat tartalmazza (16. táblázat). Az átlagfa esetében a relatív szórás értékei itt a legkisebbek, 54–90%-os értékekkel, az idős bükkösökhöz hasonlíthatók.

16. táblázat. Az átlagfa statisztikai mutatói középkorú lucos mintaterületeken; hektáronkénti fatérfogat

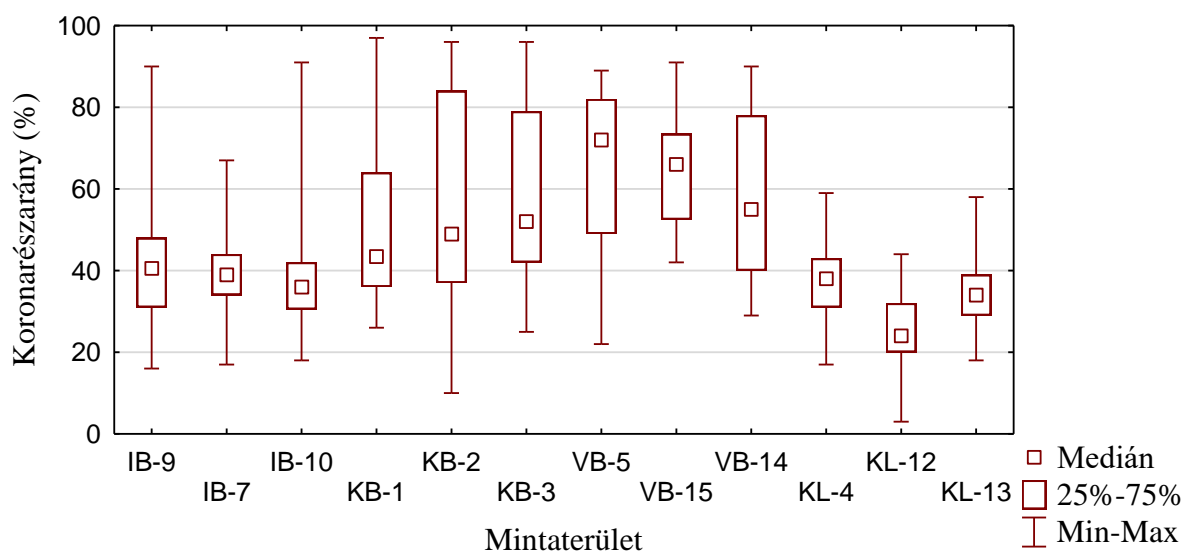
Mintaterület	Faegyed (db)	Átlagfa (m ³)	Minimum (m ³)	Maximum (m ³)	Szórás (m ³)	Fatérfogat (m ³ /ha)
13.	54	0,765	0,098	4,864	0,691	826
4.	55	0,954	0,130	2,429	0,534	1049
12.	106	0,283	0,058	0,820	0,154	601
16.	39	0,950	0,031	1,972	0,592	741
17.	31	0,978	0,050	2,847	0,719	606
Átlag	57	0,786	0,073	2,586	0,538	765

4.1.1.5. Lékek idős bükkösben

A fenti mintaterületek mellett lékes felújítógázás jelleggel végzett konzerválógázás során 2017-ben kialakított lékek is a talajinfiltráció- és szabad víz megjelenési-vizsgálatok tárgyát képezték. Ezek a lékek 33D (11. mintaterület) és 34A (6., 8. mintaterületek) erdőrészekben a 130 éves idős bükk állományban kerültek kialakításra. A lékek szabálytalan, körhöz vagy elnyújtott, ellipszishez közelítő alakúak, 1–3 famagasságnak megfelelő átmérővel (30–80 m). 60–70%-os területarányban 0,5–2,5 m magas bükk újulattal borítottak, a maradék területet jellemzően málna, borzas szeder és nagy csalán borítja.

4.1.1.6. Koronarésarány vizsgálata a talajnedvesség mérési helyein

Az egyes mintaterületek esetében a koronarésarány-eloszlások Shapiro-Wilk teszt segítségével elvégzett normalitásvizsgálatai kimutatták, hogy a választott 5%-os szignifikanciaszinten csak a vegyeskorú bükkös állománykategóriában a 14. mintaterület ($W = 0,92608$, $p = 0,06255$) és a 15. mintaterület ($W = 0,95514$, $p = 0,26595$), a középkorú lucos állománykategóriában a 4. mintaterület ($W = 0,97893$, $p = 0,44345$), a 12. mintaterület ($W = 0,98910$, $p = 0,55039$) és a 13. ($W = 0,96734$, $p = 0,42949$) esetében nem utasítható el vizsgált változó normális eloszlása. Az idős bükkös és középkorú bükkös mintaterületek esetében az adatok egy mintaterület esetében sem követik a normál eloszlást. A koronarésarány eloszlásai az egyes mintaterületek esetében a 20. ábrán láthatók.



20. ábra. Koronarésarányok az egyes állománykategóriák mintaterületein a talajnedvesség mérési helyein (IB-9, IB-7, IB-10: idős bükkös mintaterületek; KB-1, KB-2, KB-3: középkorú bükkös mintaterületek; VB-5, VB-15, VB-14: vegyeskorú bükkös mintaterületek; KL-4, KL-12, KL-13 középkorú lucos mintaterületek)

Tekintettel arra, hogy a normalitási feltétel az esetek nagy részében nem teljesül, az egyes mintaterületek koronarészarányainak összehasonlítását nemparametrikus Kruskal-Wallis ANOVA segítségével végeztem el. A Kruskal-Wallis próba eredménye ($H(11, 677) = 299,5412$ $p = 0,000$) szerint a koronarészarány tekintetében statisztikailag szignifikáns különbség van az összehasonlított csoportok közt. Az egyes mintaterületek páronkénti összehasonlításai a 17. táblázatban vannak feltüntetve. A vizsgálat eredményei szerint a koronarészarány tekintetében a középkorú bükkösök és a vegyeskorú bükkösök esetében a koronarészarány szignifikánsan nagyobb, mint a középkorú lucosok esetében, ez minden mintaterület esetén fennáll.

17. táblázat. A koronarészarányok közti eltérések az egyes mintaterületeken a Kruskal-Wallis teszt számított p -értékei szerint. (a *-gal jelölt értékek statisztikailag szignifikáns eltérést jelentenek, $\alpha=0,05$; IB-9, IB-7, IB-10: idős bükkös mintaterületek; KB-1, KB-2, KB-3: középkorú bükkös mintaterületek; VB-5, VB-15, VB-14: vegyeskorú bükkös mintaterületek; KL-4, KL-12, KL-13 középkorú lucos mintaterületek)

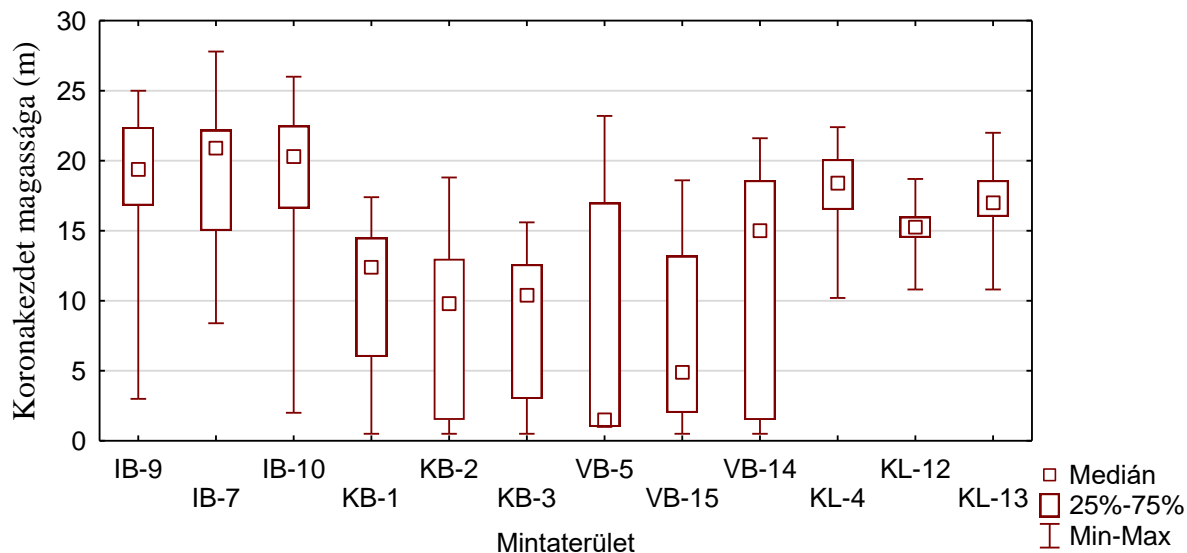
	IB-9 R:312,5	IB-7 R:317,1	IB-10 R:269,9	KB-1 R:394,9	KB-2 R:435,7	KB-3 R:454,5	VB-5 R:514,2	VB-15 R:537,6	VB-14 R:459,3	KL-4 R:272,1	KL-12 R:111,8	KL-13 R:226,4
IB-9		1,0000	1,0000	1,0000	0,2622	0,0960	0,0045*	0,0016*	0,4498	1,0000	0,0002*	1,0000
IB-7	1,0000		1,0000	1,0000	0,0877	0,0287*	0,0011*	0,0004*	0,2834	1,0000	0,0000*	1,0000
IB-10	1,0000	1,0000		0,0395*	0,0001*	0,0000*	0,0000*	0,0000*	0,0060*	1,0000	0,0004*	1,0000
KB-1	1,0000	1,0000	0,0395*		1,0000	1,0000	0,1603	0,0545	1,0000	0,0195*	0,0000*	0,0001*
KB-2	0,2622	0,0877	0,0001*	1,0000		1,0000	1,0000	0,9288	1,0000	0,0000*	0,0000*	0,0000*
KB-3	0,0960	0,0287*	0,0000*	1,0000	1,0000		1,0000	1,0000	1,0000	0,0000*	0,0000*	0,0000*
VB-5	0,0045*	0,0011*	0,0000*	0,1603	1,0000	1,0000		1,0000	1,0000	0,0000*	0,0000*	0,0000*
VB-15	0,0016*	0,0004*	0,0000*	0,0545	0,9288	1,0000	1,0000		1,0000	0,0000*	0,0000*	0,0000*
VB-14	0,4498	0,2834	0,0060*	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000		0,0038*	0,0000*	0,0000*
KL-4	1,0000	1,0000	1,0000	0,0195*	0,0000*	0,0000*	0,0000*	0,0000*	0,0038*		0,0001*	1,0000
KL-12	0,0002*	0,0000*	0,0004*	0,0000*	0,0000*	0,0000*	0,0000*	0,0000*	0,0000*	0,0001*		0,0303*
KL-13	1,0000	1,0000	1,0000	0,0001*	0,0000*	0,0000*	0,0000*	0,0000*	0,0000*	1,0000	0,0303*	

Az idős bükkösök esetében a koronarészarány egyetlen minta (10. mintaterület) esetében különbözik jelentősen egy középkorú lucos (14. mintaterület) koronarészarányától, illetve a középkorú bükkös (1., 2. és 3. mintaterületek) és a vegyeskorú bükkös (5., 14. és 15. mintaterületek) mediánjaitól. A Középkorú bükkösök és a vegyeskorú bükkösök koronarészaránya tekintetében nem utasítható el a mediánok azonossága egyetlen esetben sem.

4.1.1.7. Koronakezdet magasságának vizsgálata a talajnedvesség mérési helyein

A Shapiro-Wilk teszt segítségével elvégzett normalitásvizsgálatok a választott 5%-os szignifikanciaszinten csak a középkorú lucos állománykategóriában a 12. mintaterület ($W = 0,98500$, $p = 0,27965$) esetében nem utasítható el a koronakezdet-magasság normális eloszlása, az idős bükkös, középkorú bükkös és vegyeskorú bükkös mintaterületek esetében az adatok egy

mintaterület esetében sem követik a normál eloszlást. A koronakezdet-magasság eloszlásai az egyes mintaterületek esetében a 21. ábrán vannak feltüntetve. Az egyes mintaterületek koronakezdet-magasságainak összehasonlítását Kruskal-Wallis ANOVA segítségével végeztem el a normalitási feltételek teljesüléseinek hiánya miatt.



21. ábra. Koronakezdet-magasságok az egyes állománykategóriák mintaterületein a talajnedvesség mérési helyein (IB-9, IB-7, IB-10: idős bükkös mintaterületek; KB-1, KB-2, KB-3: középkorú bükkös mintaterületek; VB-5, VB-15, VB-14: vegyeskorú bükkös mintaterületek; KL-4, KL-12, KL-13 középkorú lucos mintaterületek)

A Kruskal-Wallis próba eredménye ($H(11, 677) = 341,0370$ $p = 0,000$) szerint a koronakezdet-magasság tekintetében statisztikailag szignifikáns különbség van az összehasonlított csoportok közt. A mintaterületek páronkénti összehasonlításai a 18. táblázatban láthatók.

18. táblázat. A koronakezdet-magasságok közti eltérések az egyes mintaterületeken a Kruskal-Wallis teszt számított p -értékei szerint. (a *-gal jelölt értékek statisztikailag szignifikáns eltérést jelentenek, $\alpha = 0,05$; IB-9, IB-7, IB-10: idős bükkös mintaterületek; KB-1, KB-2, KB-3: középkorú bükkös mintaterületek; VB-5, VB-15, VB-14: vegyeskorú bükkös mintaterületek; KL-4, KL-12, KL-13 középkorú lucos mintaterületek)

	IB-9 R:532,5	IB-7 R:525,8	IB-10 R:527,2	KB-1 R:246,9	KB-2 R:183,6	KB-3 R:190,0	VB-5 R:233,4	VB-15 R:183,5	VB-14 R:326,1	KL-4 R:509,3	KL-12 R:393,1	KL-13 R:492,2
IB-9		1,0000	1,0000	0,0000*	0,0000*	0,0000*	0,0000*	0,0000*	0,0093*	1,0000	0,0740	1,0000
IB-7	1,0000		1,0000	0,0000*	0,0000*	0,0000*	0,0000*	0,0000*	0,0040*	1,0000	0,0218*	1,0000
IB-10	1,0000	1,0000		0,0000*	0,0000*	0,0000*	0,0000*	0,0000*	0,0021*	1,0000	0,0087*	1,0000
KB-1	0,0000*	0,0000*	0,0000*		1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	0,0000*	0,0000*	0,0000*
KB-2	0,0000*	0,0000*	0,0000*	1,0000		1,0000	1,0000	1,0000	0,0571	0,0000*	0,0000*	0,0000*
KB-3	0,0000*	0,0000*	0,0000*	1,0000	1,0000		1,0000	1,0000	0,1501	0,0000*	0,0000*	0,0000*
VB-5	0,0000*	0,0000*	0,0000*	1,0000	1,0000	1,0000		1,0000	1,0000	0,0000*	0,0019*	0,0000*
VB-15	0,0000*	0,0000*	0,0000*	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000		0,4897	0,0000*	0,0000*	0,0000*
VB-14	0,0093*	0,0040*	0,0021*	1,0000	0,0571	0,1501	1,0000	0,4897		0,0055*	1,0000	0,0247*
KL-4	1,0000	1,0000	1,0000	0,0000*	0,0000*	0,0000*	0,0000*	0,0000*	0,0055*		0,0229*	1,0000
KL-12	0,0740	0,0218*	0,0087*	0,0000*	0,0000*	0,0000*	0,0019*	0,0000*	1,0000	0,0229*		0,1610
KL-13	1,0000	1,0000	1,0000	0,0000*	0,0000*	0,0000*	0,0000*	0,0000*	0,0247*	1,0000	0,1610	

A 18. táblázatban feltüntetett p -értékek alapján látható, hogy az idős, egykorú bükkösök koronakezdet-magassága a szignifikánsan különbözik a vegyeskorú bükkösök és a középkorú bükkösök koronakezdet-magasságától. A vegyeskorú bükkösök és a középkorú bükkösök mintaterületeinek összehasonlítása során ugyanakkor egyetlen esetben sem lehet kimutatni szignifikáns különbséget a koronakezdet-magasság tekintetében, nem utasítható el a mediánok azonossága. Szignifikáns különbség van ugyanakkor a középkorú bükkösök és a középkorú lucosok koronakezdet-magasságai közt is az összes mintaterület összehasonlításában, valamint egy kivételtől eltekintve (a 14. vegyeskorú bükkös mintaterület és a 12. középkorú lucos mintaterület összehasonlítása) a vegyeskorú bükkösök és a középkorú lucosok mintaterületei közt is.

4.1.2. Állományfelmérések eredményeinek értékelése

A vizsgált faállományok kategóriákba sorolása (középkorú bükkös, idős bükkös és vegyeskorú bükkös, középkorú lucos) korszerkezetük és fafajösszetételük alapján történt, ezek a fő jellemzők alapvetően meghatározzák az egyes állományok szerkezeti különbségeit. A kráterben zajló, vizsgált erdő-tó összefüggések tekintetében az egyes kategóriák eltérő módon viselkedhetnek. A talajinfiltráció-sebesség és a talajnedvességgel kapcsolatos szabad víz megjelenések tekintetében a különböző állományok módosíthatják a vizsgált folyamatokat. A különböző állománykategóriák a talajok tulajdonságait nemcsak a talaj erőforrásainak eltérő kihasználása, illetve a lebomlási folyamatok során a talajba jutó ásványi- és szervesanyagok által, hanem állományklímájuk jellegzetességein keresztül is befolyásolják.

A záródás tekintetében az állományok közt legfeljebb 15%-os eltérést azonosítottam, a középkorú és idős bükkösök esetében a mintaterületekben a záródás 95-100%, a vegyeskorú bükkös mintaterületek esetében 90%-ra becsültem, a középkorú lucosok esetében 85 – 100%. A záródásban megjelenő eltérések nem jelentősök a különböző bükkös állománykategóriák esetében, a középkorú lucosok két esetben (16. és 17. mintaterület) volt alacsonyabb, 85%-ra becsült, majdnem teljes záródás.

A középkorú és idős egykorú bükkösök közepes fatermőképességi kategóriába sorolhatók, 8 m³/ha-t meghaladó folyónövedéssel, a lucosok a magas, a bükkösökhöz viszonyítva kétszeres, 16 m³/ha-os folyónövedéssel jellemezhetők a Szent Anna-tó kráterében. A hektáronkénti fatérfogatok magasak minden kategóriában, a középkorú, 65 éves bükkösben felvételezett mintaterületek alapján is 450 m³/ha fölötti értékekkel (453–546 m³) jellemezhetők 0,212–0,343 m³-es átlagfa-térfogat mellett. Az idős, 130 éves bükkös mintaterületek esetében a fatérfogat 695–796 m³/ha, az átlagfa térfogata 1,595–3,060 m³, a vegyeskorú bükkösök esetében az idős bükköshöz hasonló nagyságrendűek a mintaterületek alapján számolt hektáronkénti fatérfogatok

(606–977 m³/ha), 2,160–3,398 m³-es átlagfatérfogattal. A 60 és 65 év közötti korú lucosok esetében a fatérfogatok magasak, 601–1049 m³/ha értékkel, az átlagfa-térfogat 0,283–0,978 értékei mellett. A hektáronkénti magas fatérfogatok, illetve magas folyónövedék jelentősége hidrológiai szempontból is számottevő, magas vízigényt és magas evapotranszpirációt is jelent.

A koronarészarányok tekintetében végzett összehasonlítások alapján a középkorú lucosok alacsonyabb koronarészarány-értékkel jellemezhetők, a középkorú bükkösök és a vegyeskorú bükkösök koronarészarányai szignifikánsan magasabbak. Az idős bükkösök két mintaterületének esetében is fennáll ez a szignifikáns különbség a középkorú, valamint a vegyeskorú bükkösökkel történő összehasonlításban. A statisztikai összehasonlítás tárgyát képező, szabad víz megjelenésének kimutatására irányuló talajnedvesség-vizsgálatok mérési helyein a középkorú lucos mintaterületek 25,1–36,9%-os koronarészarányal jellemezhetők. Az idős bükkös mintaterületek alacsonyabb (38,2–41,2%) átlagai az erdőművelési gyakorlat következtében alakulhattak ki, vélhetőleg az egykorú állományban a konzerváló vágások alsószinti gyérítés jelleggel évtizedekkel ezelőtt elvégzett beavatkozásainak az eredményeként, erre utalhat az V. Kraft-osztály elnyomott fáinak a hiánya is. A magas koronarészarány a középkorú bükkös állománykategória esetében (a mintaterületek 51,5 és 57,1% közti átlagos koronarészarányal jellemezhetők), a magas hektáronkénti törzsszámok és teljes záródás mellett összefügghet azzal a ténnyel, hogy az üzemtervi nyilvántartások alapján az állományban utóbbi évtized folyamán csak egy alkalommal volt a területen egy gyenge erélyű (16 m³/ha, 3%-os térfogatarányos intenzitás) gyérítés végezve. A vegyeskorú bükkös mintaterületekben a legmagasabbak a koronarészarányok (a mintaterületek átlagai 58,6%, 65,4% és 65,8%), a magas koronarészarány egyértelműen a vegyeskorú szerkezet következtében változatos átmérő és famagasság-eloszlással jellemezhető egyenetlen lombsátor függőleges záródási viszonyainak következménye. Az egyes fák magassága és koronarészaránya együtt határozza meg a koronater függőleges kiterjedését, amely az állományklíma alakulása szempontjából is nagy jelentőséggel bírhat, befolyásolva a koronarenció mértékét, hőmérsékletet, páratartalmat, légáramlást. Figyelemre méltó tény, hogy a koronarészarányok tekintetében a középkorú, egykorú bükkös és a vegyeskorú bükkös állománykategóriák esetében nem mutatható ki szignifikáns eltérés egyetlen mintaterület esetében sem.

A koronakezdet-magasság a törzstér vertikális kiterjedését is kifejező mutató. Az állományklíma szempontjából ennek jelentős szerepe lehet, a törzstérben a páratartalom és a légáramlásviszonyok jelentősen eltérhetnek a koronaterhez képest, a talaj nedvességviszonyai is eltérően alakulhatnak a különböző koronakezdet-magasság viszonyok mellett. A vizsgált állománykategóriákban az idős bükkös koronakezdet-magassága szignifikánsan nagyobb, mint a

középkorú bükkös és a vegyeskorú bükkös esetében, ez utóbbi két kategória közt azonban nincs szignifikáns eltérés. A középkorú lucosok esetében koronakezdet-magassága a középkorú bükkös mintaterületekénél szignifikánsan magasabb, ez a vegyeskorú bükkös állománykategóriával végzett összevetésben is egy kivétellel (14. vegyeskorú bükkös mintaterület és 12. középkorú lucos mintaterület) elmondható. A koronakezdet-magasság értékek szignifikáns eltérései főleg az azonos fafajú, hasonló biológiai felsőmagassággal jellemezhető idős bükkös (34,8–35,2 méteres biológiai felsőmagasságok) és vegyeskorú bükkös (32,7–36,7 méteres biológiai felsőmagasságok) állománykategóriák összehasonlításában fejeznek ki egyértelmű állomány szerkezeti különbséget, de eltérő szerkezetet bizonyítanak a különböző biológiai felsőmagassággal jellemezhető középkorú bükkös (23,7–27,1 méteres biológiai felsőmagasságok) és a vegyeskorú bükkös mintaterületek hasonló koronakezdet-magasságai is.

A középkorú bükkösök, idős bükkösök és középkorú lucosok esetében az újulati- és cserjeszint hiányzik, a vegyeskorú állományok esetében két mintaterület esetében elszórtan előforduló 0,3–0,5 m magas bükk csemeték (5. mintaterület), 0,5–1,5 m magas bükk, luc- és jegenyefenyő csemeték (14. mintaterület), valamint 80%-os területarányú 1–2 m magas bükk újulat borítja (15. mintaterület)

A Szent Anna-tó kráterének vizsgált állományaiban a középkorú lucosok és az idős bükkösök törzstere magasabb, nyitottabb, mint a középkorú és vegyeskorú bükkösök törzstere. Az újulati szint csak a vegyeskorú állományok mintaterületeinek esetében jelenik meg, ezáltal tovább csökkentve a törzstér áttörtségét.

4.2. Talajinfiltrációs vizsgálatok eredményeinek ismertetése és értékelése

4.2.1. Talajinfiltrációs vizsgálatok eredményei

Az erdő felszínborítás esetében az idős bükkös és a középkorú lucos faállomány-kategóriák, illetve a bükk-lékek szerkezete a 4.1.1. fejezetben leírtak szerinti.

A gyeperdő felszínborítási kategóriát a tópart füves területei képezik, a tó K-i és ÉK-i partján. Ezeket a jellegtelen gyepeket főleg vörös csenkesz, réti perje, egynyári perje, csomós ebír borítja, emberi hatásnak kitett, taposott, különböző mértékben gyérült, de még folyamatos lágyszárúborítottsággal jellemezhető füves térségeket alkotnak (Szmolka és Frank, 2022a).

A turizmus következtében intenzív taposásnak kitett területrészek földutakká, ösvényekké alakultak, amelyek a kráterperemen található parkoló és a tó közötti szakaszon, valamint a tó körül futnak, ezek a növényzet hiányával jellemezhető taposott földfelszínek. A kráterperem és a tó közötti összekötő ösvény meredekebb szakaszain a talaj felső szintje erodálódott, a kisebb

lejtésű részeken erősen tömörödött felszint képez, a fák gyökérzetének felső részei a talaj felszínén kiálló hálózatot alkotnak, ezáltal védve a talajt a további lemosódástól. Ezekben az ösvényekben felszíni folyások nyomai láthatók, főleg nagy intenzitású csapadékok után, lombos fajok levelei, fenyőtűk torlaszai gyűlnek össze az egyes akadályoknál (az ösvény irányára merőleges futású gyökerek, lehullott ágak, kidőlt vékonyabb törzsek stb.). A tóparton futó vízszintes földutakat az avar (főleg bükk és lucfenyő levélzete) és egyéb növényi részek aprózódása és bomlása során keletkezett és a minerális talajrészekkel keveredett fekete sár borítja, amely a mélyedésekben vastagabb réteget képez, a csapadékesemények során felszíni vízgyülekezések (tócsák) alakulnak ki (Szmolka és Frank, 2022a).

Az állandósult infiltrációs ráta értékei (19. és 20. táblázat) nagyon magasak voltak (>145 mm/h) minden mintában a lucosok és az idős bükkösök esetében, ugyancsak nagyon magas értékek voltak mérve a lékekben, egyetlen mérést kivéve, amely a nagyon alacsony (1,1-5,0 mm/h) kategóriába esett. A gyepes esetében az infiltrációs ráta értékei az alacsony (5,1-30 mm/h) és a nagyon magas infiltrációs sebesség közötti intervallumban helyezkedtek el.

19. táblázat. Az állandósult talajinfiltrációs ráta (mm/h) méréseinek eredményei a Szent Anna-tónál

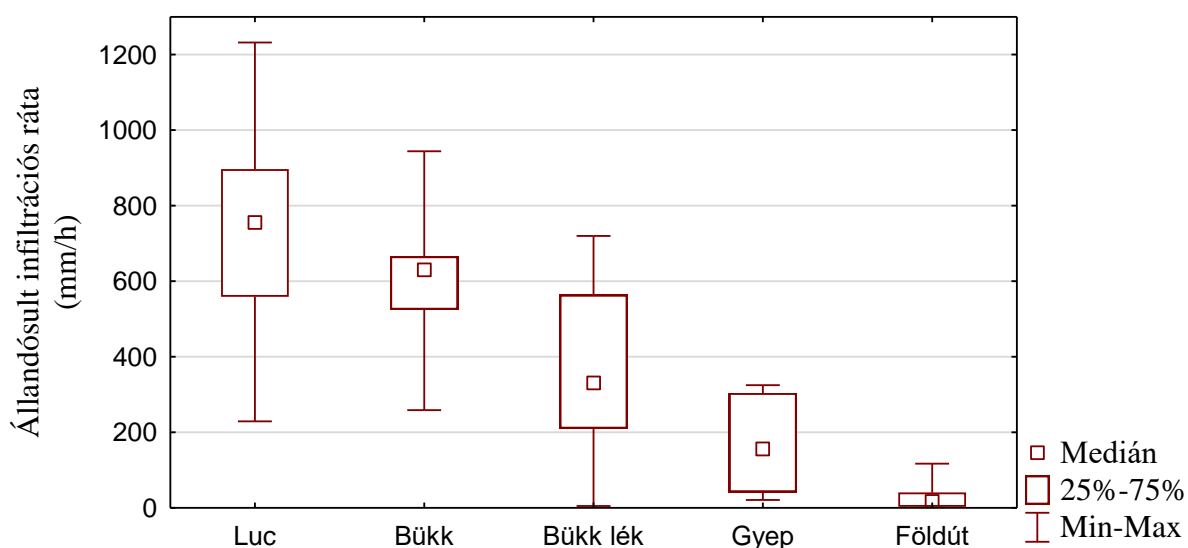
Lucos	Idős bükkös	Lék idős bükkösben	Gyep	Földút
756	259	5	42	117
659	635	302	21	41
890	525	210	304	28
573	884	360	325	3
1115	570	581	82	2
1232	944	155	286	2
229	634	229	164	3
249	460	720	323	80
897	627	426	24	23
559	666	564	148	12
847	-	-	-	-

A legalacsonyabb infiltrációs értékek a földutak esetében voltak mérve, ezek értékei a nagyon alacsony és a közepes (30,1–70 mm/h) kategóriák között helyezkedtek el, egyetlen mérés kivételével, amely a magas (70,1-145 mm/h) állandósult infiltrációsebesség-kategóriába volt sorolható a Târziu által közölt osztályozás szerint (Târziu, 1997).

Amint a 22. ábrán látható, az állandósult infiltrációs ráták értékei az 1200 mm/h-t meghaladó értéktől (lucosok) egészen a szinte 0 mm/h értékig (földutak) terjednek.

20. táblázat. Az állandósult infiltrációs ráta (mm/h) leíró statisztikái az egyes faállomány-típusokban és földhasználati kategóriákban

Kategória	Átlag	Min.	Max.	Szórás
Lucos	727,8182	229	1232	317,6985
Idős bükkös	620,4000	259	944	195,7045
Lék idős bükkösben	355,2000	5	720	219,9135
Gyep	171,9000	21	325	127,7910
Földút	31,1000	2	117	38,8457



22. ábra. A földhasználati mód és a faállományok hatása a talaj állandósult infiltrációs rátájára a Szent Anna-tó kráterének belső lejtőin (Szmolka és Frank, 2022a)

A 21. táblázatban látható, hogy az egyszempontos varianciaanalízis statisztikai szempontból szignifikáns különbséget mutat a csoportok közt ($F(2, 28) = 5,950$, $p = 0,007$) az egyes faállománytípusok összehasonlításában.

21. táblázat. Az egyszempontos varianciaanalízis eredménye az állandósult infiltrációs ráták tekintetében; Az egyes faállománytípusok esetében statisztikai szempontból szignifikáns különbség mutatható ki ($\alpha=0,05$)

Hatás	SS	DF	MS	F	p	Részleges η^2	Non-centralitás	Megfigyelt statisztikai erő ($\alpha=0,05$)
Kategóriák között	760491	2	380246	5,9504	0,007022	0,298258	11,9007	0,841082
Kategóriákon belül	1789284	28	63903					

A Tukey Unequal N HSD post hoc teszt (22. táblázat) statisztikailag szignifikáns különbséget mutat a lucosok és az idős bükkösökben kialakított lécek állandósult infiltrációs rátái közt.

22. táblázat. A Tukey Unequal N HSD teszt eredményei az egyes faállomány kategóriákra (1. lucos, 2. Idős bükkös, 3. Lék idős bükkösben; a *-gal jelölt értékek statisztikailag szignifikáns eltérést jelentenek, $\alpha=0,05$)

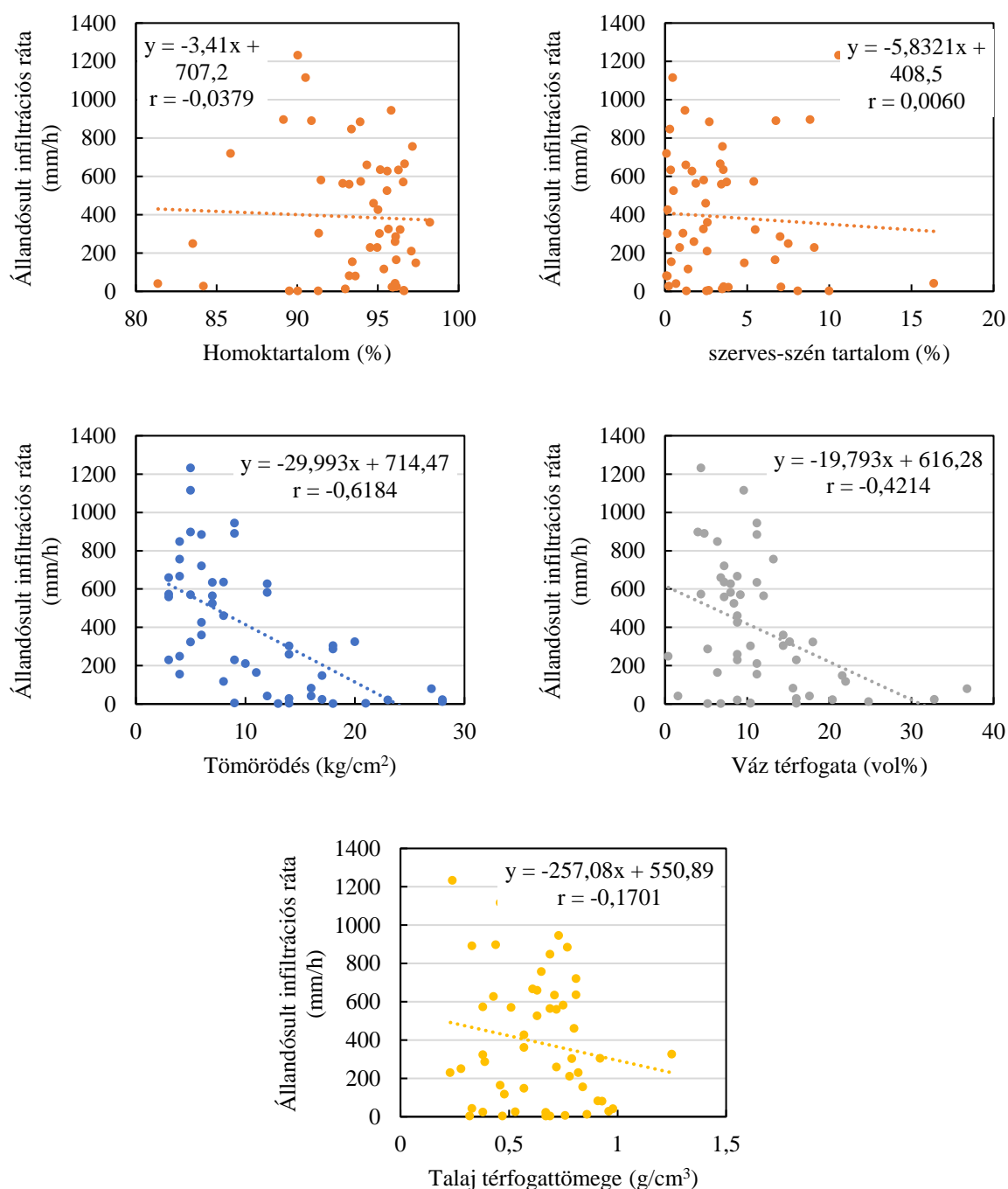
Kategória	1.	2.	3.
1.		0,613823	0,007384*
2.	0,613823		0,065840
3.	0,007384*	0,065840	

Statisztikailag szignifikáns különbségek mutathatók ki az egyes földhasználati kategóriák közti összehasonlításban a Kruskal-Wallis próba eredményei ($H(2, 51) = 28,97883, p < 0,0001$) alapján (23. táblázat).

23. táblázat. Az egyes földhasználati kategóriák közti állandósult infiltrációs ráták közti különbségek. A Kruskal-Wallis teszt számított p -értékei (1. Erdők, 2. gyepek, 3. földutak; a *-gal jelölt értékek statisztikailag szignifikáns eltérést jelentenek, $\alpha=0,05$)

Földhasználati kategória	1. R: 34,581	2. R: 18,100	3. R: 7,300
1.		0,006903*	0,000001*
2.	0,006903*		0,312824
3.	0,000001*	0,312824	

Az egyes faállományok és földhasználati kategóriák állandósult infiltrációs rátái közt megjelenő jelentős különbségek okainak feltárása érdekében a talaj felszíni rétegének egyes tulajdonságai (4. melléklet) és az állandósult infiltrációs ráta közti korrelációkat vizsgáltam (23. ábra). A talajminták magas (> 81%) homoktartalma következtében és tekintettel arra, hogy nagyon gyenge, elhanyagolható összefüggés volt kimutatható a homoktartalom és az állandósult infiltrációs ráta értéke között ($r(49) = -0,0379, p = 0,792$), a vályog- és agyagtartalom meghatározásának elvégzésére nem került sor, mert nem volt várható jelentős korreláció. Az állandósult infiltrációs ráta és a talaj szervesszén-tartalma ugyancsak nagyon gyenge negatív korrelációban állt egymással ($r(49) = -0,0599, p = 0,676$). Hasonlóan nagyon gyenge negatív összefüggést mutatott a talaj térfogattömegének az állandósult infiltrációs rátával történt összevetése ($r(49) = -0,1701, p = 0,233$). Közepes negatív korrelációval jellemezhető az állandósult infiltrációs ráta és a talaj vázartalma közti kapcsolat ($r(49) = -0,4214, p = 0,002$). Erős negatív korreláció volt kimutatható az állandósult infiltrációs ráta és a talaj tömörsége között ($r(49) = -0,6184, p < 0,001$) (Szmolka és Frank, 2022a).



23. ábra. Az állandósult infiltrációs ráta és a talaj homok-, szerveszén-tartalma, tömörsége, váztartalma és térfogattömege közti korrelációk (Szmolka és Frank, 2022a)

A Kruskal-Wallis próba eredményei szignifikáns különbséget mutatnak az erdők és a többi (gyepek, földutak) földhasználati kategóriák talajtömörsége között (24. táblázat). Nincs jelentős statisztikai eltérés a gyepek és a földutak talajainak tömörségértékei közt. A faállománykategóriák (középkorú lucos, idős bükkös, és lék idős bükkösben) közt talajtömörség tekintetében nem mutathatók ki szignifikáns statisztikai eltérések (Szmolka és Frank, 2022a).

24. táblázat. A talajtömörödés közti különbségek az egyes földhasználati kategóriákban. A Kruskal-Wallis próba számított p értékei (1. faállományok; 2. gyepek; 3. földutak; a *-gal jelölt értékek statisztikailag szignifikáns eltérést mutatnak $\alpha=0,05$)

Földhasználati kategória	1. R: 34,581	2. R: 18,100	3. R: 7,300
1.		0,000249*	0,000064*
2.	0,000249*		1,000000
3.	0,000064*	1,000000	

4.2.2. Talajinfiltrációs vizsgálatok eredményeinek értékelése

A földhasználati mód állandósult infiltrációs rátára gyakorolt hatását bemutató eredmények bizonyítékkul szolgálnak az erdő azon képességére, hogy a talaj hidraulikus vezetőképességének magasabb értékeit biztosítsa a más földhasználati kategóriákhoz képest, az itt mért értékek átlagai sokkal magasabbak, mint a gyepek és földutak esetében.

Az egyes faállománytípusok közti összehasonlítást tekintve a mérések eredményei azt mutatják, hogy a legmagasabb állandósult infiltrációs ráták a magas 85-100%-os záródással jellemezhető lucosok és idős bükkösök alatt fordulnak elő, az állandósult infiltrációs ráta átlagértéke 727 mm/h a középkorú lucosok és 620 mm/h az idős bükkös esetében. Tekintettel arra, hogy ezek alatt az állományok alatt az állandósult infiltrációs ráta értéke minden mérés esetében magasabb volt mint 200 mm/h, a felszíni vízfolyások kialakulásának valószínűsége nagyon alacsony. Figyelembe véve ezeknek az állományoknak a korona-intercepcióját is, olyan állományi csapadék kialakulásának a valószínűsége, ami ezt a 200 mm/h állandósult infiltrációs sebesség-értéket meghaladja, elhanyagolható. Felszíni folyások kialakulása ezek alatt a faállományok alatt csak olyan csapadékesemények során, vagy hóolvadáskor valószínűsíthető, amikor a vízzel telített talaj felső rétege teljesen megfagyott, és ezáltal a víz infiltrációja nem tud megtörténni.

Az idős bükkösben képzett lécek esetében az állandósult infiltrációs ráta 350 mm/h-t meghaladó sebessége is kedvező állapotként jellemezhető. A felszíni lefolyások megjelenésének lehetősége azonban nagyobb, kevésbé kedvezőtlen körülmények között is meg tud történni, mint a lucosok és az idős bükk kategória esetében, tekintettel arra, hogy 5 mm/h értékű állandósult infiltrációs ráta is mérve volt egy mintavételi hely esetében. A kialakított bükkös lécekben az ezeket körülvevő bükköshöz képest szinte felére lecsökkent az infiltrációs sebesség átlagértéke, de a szórások mértéke miatt statisztikailag az eltérés nem szignifikáns. A középkorú lucos és idős bükkös kategóriák összehasonlítását tekintve az állandósult infiltrációs ráta nem különbözik jelentősen, azonban a középkorú lucos és a bükkös lék kategóriák tekintetében az eltérés statisztikailag szignifikáns (22. táblázat).

A középkorú lucosokban, az idős bükkösökben és még a bükkösben kialakított lékekben is a talaj állandósult infiltrációs rátái megfelelően magas értékűek, ezek a területek a felszíni lefolyások kialakulásával szemben hatékony védelmet biztosítanak, ezáltal a védelmi szerepük a Szent Anna-tó szedimentációjának és a kráter oldalában felhalmozódó tápanyagok tóba kerülésének szempontjából nagyon fontos. Az idős bükkösökben kialakított lékekben mért alacsonyabb értékek még megfelelően magasak ahhoz, hogy ez a jellemzően bükk újulatokkal borított kategória megfelelő védelmi funkcióval rendelkezzen. A kisméretű lékek megjelenése, amelyek természetes okból vagy az erdőgazdálkodás következtében rövid ideig (a megjelenő újulatok záródásáig) tartó záródáshiánnyal jellemezhetők, nem okozza a talajvédelmi funkció jelentős romlását, nem jelent fenyegetést a tó feltöltődése szempontjából, a fokozatos bontáson alapuló erdőfelújítási beavatkozások alkalmazása hordalék-bemosódás szempontjából nem jelent kockázatot a kráterben.

Annak ellenére, hogy a mérések, technikai okok miatt csak 20° -ot nem meghaladó lejtésű helyeken voltak végezve, az eredményekből kitűnik, hogy a talaj tömörödése a beszivárgást befolyásoló legfontosabb tényező és nincs jelentős különbség a bükkös illetve a lucos állományok között, valószínűsíthető, hogy a meredekebb lejtésű lucosokkal vagy bükkösökkel borított kráterrészek infiltrációs rátái is megfelelően magas értékekkel jellemezhetők, ezek nem különböznek jelentősen a 20° -nál kisebb lejtésű területek értékeitől, és ezáltal feltételezhetően megfelelő védelmet biztosítanak a felszíni erózióval és avar-, talaj-bemosódással szemben.

A földhasználati kategóriák szerinti összehasonlításban a faállományok állandósult infiltrációs rátája szignifikánsan magasabbak, mint a kráterben található gyepek és a földutak állandósult beszivárgási rátái. Az állandósult talajinfiltrációs ráták átlagértéke a gyepek esetében kevesebb, mint fele az idős bükkösökben kialakított lékekben mért állandósult infiltrációs ráták átlagának.

A földutak, ösvények állandósult infiltrációs rátái általánosan nagyon alacsonyok, átlagértékük több, mint tízszer kisebb a bükkös lékekben mért értékek átlagánál, egyes helyeken ezek gyakorlatilag nullának értékelhetők. Annak ellenére, hogy a gyepek állandósult beszivárgási sebességének átlagértéke a magas infiltrációs sebesség kategóriába sorolható, a faállományokkal végzett összehasonlításban ez szignifikánsan alacsonyabb értéket képvisel, ami egy kevésbé kedvező helyzetet tükröz. Több mintavételi helyen a mérés eredménye alacsony értékű, ami azt igazolja, hogy felszíni vízfolyások kialakulhatnak a gyepek egyes területrészein intenzív csapadék-események alkalmával. Az alacsonyabb állandósult infiltrációs ráta mellett itt a faállományokban megjelenő csapadék-intercepció sem érvényesül. Annak ellenére, hogy a gyepes területek lejtése a kráterben nem meredekebb, mint 10° , és a lejtők hossza is átlagosan kevesebb

mint 50 m, a legnagyobb hossz pedig 160 m, jelentős mennyiségű minerális és szervesanyag-mennyiség (talaj- és növényi részek, más, állati vagy antropogén eredetű hulladék) található ezeken a felületeken, amelyek a tóba mosódhatnak. A nagyobb méretű hulladékok, növényi részek, emberi taposás okozta aprózódása elősegíti ezt a folyamatot.

A földutak, ösvények az állandó emberi taposás következtében alakultak ki, a talajfelszín a növényzettől teljesen lecsupaszított. A mérések eredményei az állandósult infiltrációs ráta alacsony, nagyon kedvezőtlen értékeit mutatják a legtöbb mérés esetében. A felszíni vízgyülemések és a felszíni folyások nyomai megtalálhatók ezeknek a földutakon minden nagyobb intenzitású csapadékesemény után. A gyepek és földutak állandósult infiltrációs rátái közti statisztikailag jelentős eltérés hiánya inkább a gyepek kedvezőtlen állapotával magyarázható, amelyek az egyes területrészekén jelentős turisztikai nyomásnak vannak kitéve, a taposást beleértve, ennek összes a talajt érintő negatív hatásával. A mérések eredményei alapján a hordaléktranszportban jelentős szerep tulajdonítható a kráterperem turista-fogadó részéről, a parkolóktól a tópartra vezető ösvényeknek. Annak ellenére, hogy műút vezet a tópartig, a látogatók jelentős része a tópartot a legrövidebb útvonalon, ezeken az ösvényeken közelíti meg. Ezek a földutak a Szent Anna-tavat magas hordaléktartalmú felszíni folyásokkal táplálják az intenzív csapadékesemények alkalmával.

Az egyes földhasználati kategóriák állandósult beszivárgási rátái közt tapasztalható különbségek egyértelműen magyarázzák az intenzív csapadékesemények alkalmával megfigyelhető jelenségeket. A víz pangása és a felszíni lefolyások megjelenése a földutakon ennek a kategóriának a nagyon alacsony beszivárgási sebességeivel magyarázható. A gyepek valamelyest hatékonyabb védelmet biztosítanak, mint a földutak, de ennek ellenére felszíni vízfolyások intenzívebb csapadékesemények alkalmával itt is kialakulhatnak.

A talaj szervesszén-tartalmának és térfogattömegének a változásai nem magyarázzák az állandósult talajinfiltrációs ráta esetében feltárt különbségeket. Annak ellenére, hogy közepes mértékű negatív korreláció kimutatható az állandósult infiltrációs ráta és a talaj volumetrikus váztartalma közt, a váztartalomnak, mint az infiltrációs rátát döntően befolyásoló tényezőnek a megjelölése megkérdőjelezhető. Valószínűbb, hogy a váztartalom arányának a gyepek és a földutak esetében kimutatható növekedését (4. melléklet) a talajnak a felszíni vízfolyások által okozott szelektív eróziója váltotta ki (Szmolka és Frank, 2022a) és a talaj tömörödése határozható meg, mint az infiltrációs ráták közti eltérésekért felelős fő tényező (23. ábra).

Az intenzív turizmus, a tó népszerűségének növekedése által kiváltott folyamatosan növekvő éves látogatói létszámok miatt az egyre erőteljesebb taposás a gyepek és a földutak területén a

talaj folyamatos tömörödését, a pórusterfogat csökkenését okozza. A talaj ezen tulajdonságainak természetes regenerálódása nem tudja ezt a hatást ellensúlyozni.

A mérési eredmények alapján egyértelműen kijelenthető, hogy a tóba bemosódó szerves és szervetlen üledékek fő forrását a földutak, és valamelyest kisebb mértékben a tó partján található gyepek képezik. Az egyes faállományok nem bolygatott talajáról a felszíni hozzáfolyások által a tóba kerülő üledék mennyisége elhanyagolható. A tóba az erdőkből származó biomassza (levelek, ágak, rügpikkelyek stb.) a gyepek, földutak felületére hullásának következtében mosódik be, a szél által történő szállítás útján, vagy a tóparton található fákról való lehullása során kerül a tó medrébe. A gyepeknek tulajdonított, a felszíni folyások üledékét kiszűrő szerepe a Szent Anna-tó esetében, a gyepek degradációja, folyamatos bolygatása, taposása miatt, a lecsökkent infiltrációs ráta következtében erősen korlátozott.

Az erdei vegetáció a talaj magas infiltrációs rátájának fenntartása által az eróziós folyamatok elleni erős védelmet biztosít. A magas infiltrációs ráták a víznek a talaj mélyebb, a gyökérszóna alatti rétegjeibe történő gyors beszivárgását teszik lehetővé, ezáltal ez a vízmennyiség a felszín alatti hozzáfolyás révén a tó vízkészletét hordalékbehordás nélkül gyarapíthatja.

A talajerózió elleni védelem és a tó feltöltődési folyamatának lassítása szempontjából a kráterbelső magasfokú erdőszülségének fenntartása kívánatos, az erdőgazdálkodás a stabil, a biotikus és abiotikus károsító tényezőkkel szembeni magas ellenállóképességű állományszerkezetek létrehozását és fenntartását kell prioritásként kezelje. A jelenleg alkalmazott, hosszú felújítási idejű, fokozatos felújítógátásokat alkalmazó erdőgazdálkodás a védelmi funkció fenntartása mellett képes ezeket a célokat elérni, akár a kisméretű (1-3 állománymagasságot nem meghaladó átmérőjű) egyenlőtlen bontások alkalmazása által is. A kisebb, néhány ár méretű széltörések, széldöntések nem okozhatnak különösebb problémát a talajok beszivárgási sebessége szempontjából, de a nagyterületű tarvágások alkalmazása természetesen az eróziós folyamatok megjelenését váltaná ki a könnyű, homokos, homokos-vályog fizikai féleséggel jellemezhető talajokon. A tó hosszútávú fenntartása szempontjából a földutak és a nagymértékű taposásnak kiszolgáltatott gyepek problémakörének a megoldása szükséges, a földutak felszámolása, borítása, vízlevezetése és a gyepekre nehezedő antropogén nyomás csökkentése által (Szmolka és Frank, 2022a).

4.3. A tó vízmérleg-vizsgálat eredményeinek ismertetése és értékelése

4.3.1. A tó vízmérleg-vizsgálatának eredményei

A többváltozós lineáris regresszió módszerével végzett statisztikai elemzés eredményei a 25. táblázatban láthatók.

25. táblázat. A többváltozós lineáris regresszió statisztikai mutatói

Mutató	Érték
R	0,9848
R ²	0,9698
Adjusztált R ²	0,9697
F(2, 409)	6586
p	<0,0000
A becslés standard hibája	0,9760
N	412

Az R² értéke alapján elmondható, hogy a vízszint-változások varianciáját 96,9%-ban magyarázzák a vízmérleg csapadék és párolgás komponensei. Prediktív szempontból a modell szignifikáns, az F statisztika p értéke sokkal kisebb mint 0,05. A többváltozós lineáris regresszió együtthatói a 26. táblázatban vannak feltüntetve (a megfigyelések száma N = 412).

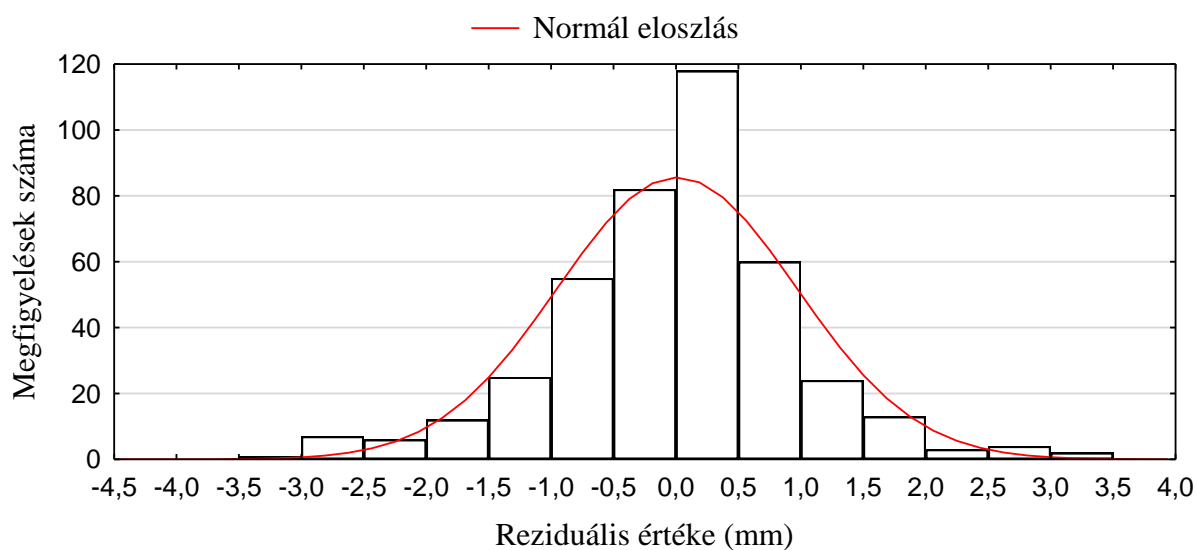
26. táblázat. A többváltozós lineáris regressziós modell együtthatói

Komponensek	Együttható (β)	Standard hiba	t statisztika	p-érték
Csapadék (CS)	1,04259	0,009524	109,4638	<0,0000
Párolgás (P)	-1,02487	0,032887	-31,1630	<0,0000
Szabad tag	0,04662	0,111188	0,4193	0,6752

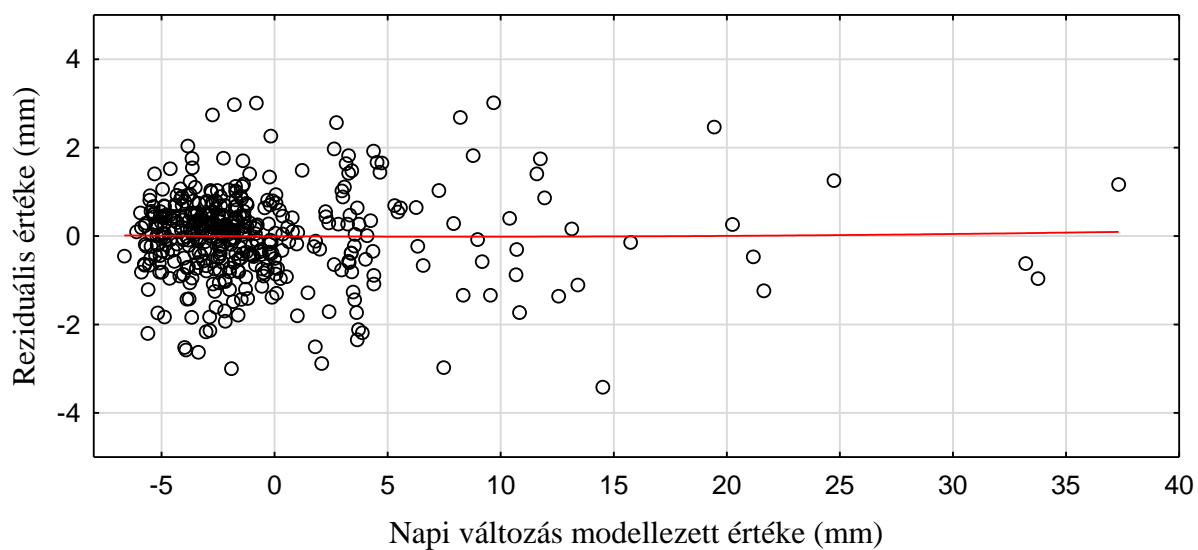
A független változók együtthatóinak vizsgálata azt mutatja, hogy ezek statisztikailag szignifikánsak. A regressziós egyenlet a következő alakú lesz:

$$\Delta S = 0,04662 + 1,04259CS - 1,02487P \quad (11.)$$

A többváltozós lineáris regresszió normalitási feltételének teljesülését a reziduálisok eloszlását bemutató 24. ábra jól tükrözi. A linearitási feltétel teljesülését a 25. ábra mutatja. A reziduálisoknak a modellezett napi változások függvényében történő illeszkedési hiány ábrája alapján a linearitás feltételének jó minőségű teljesülése látható, a pontfelhő alakja nem ad okot heteroszkedaszticitás feltételezésére sem.

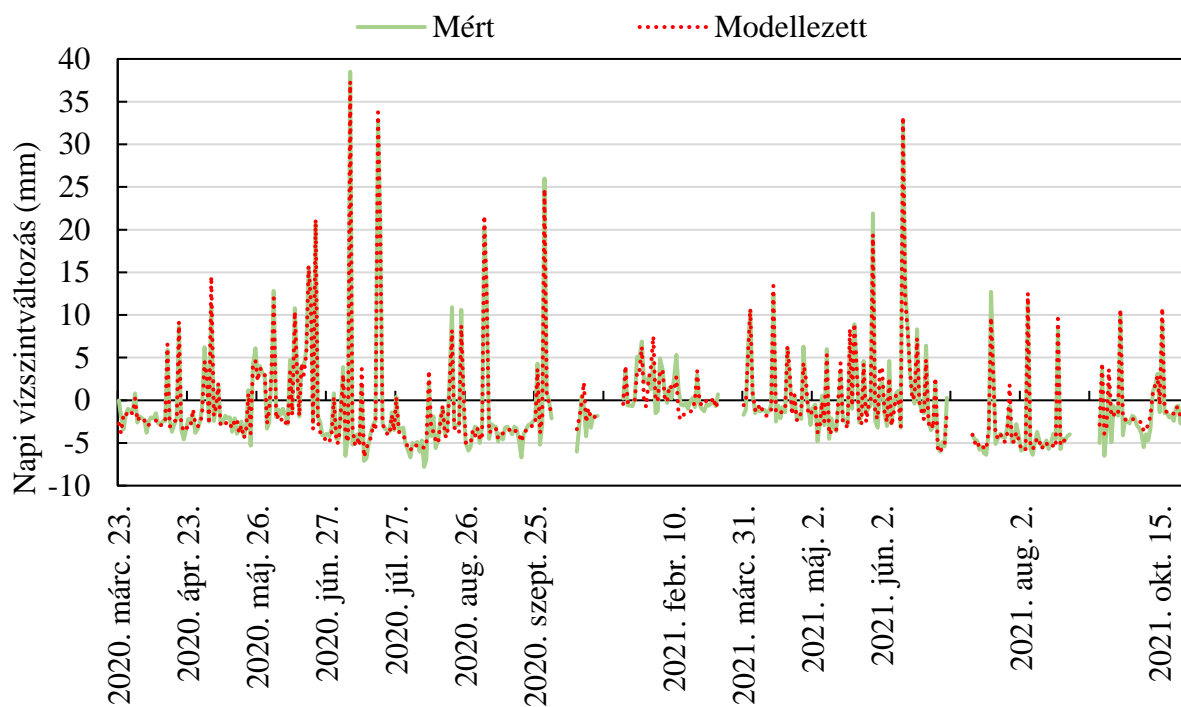


24. ábra. A modellezett napi vízszintváltozások reziduálisainak hisztogrammja

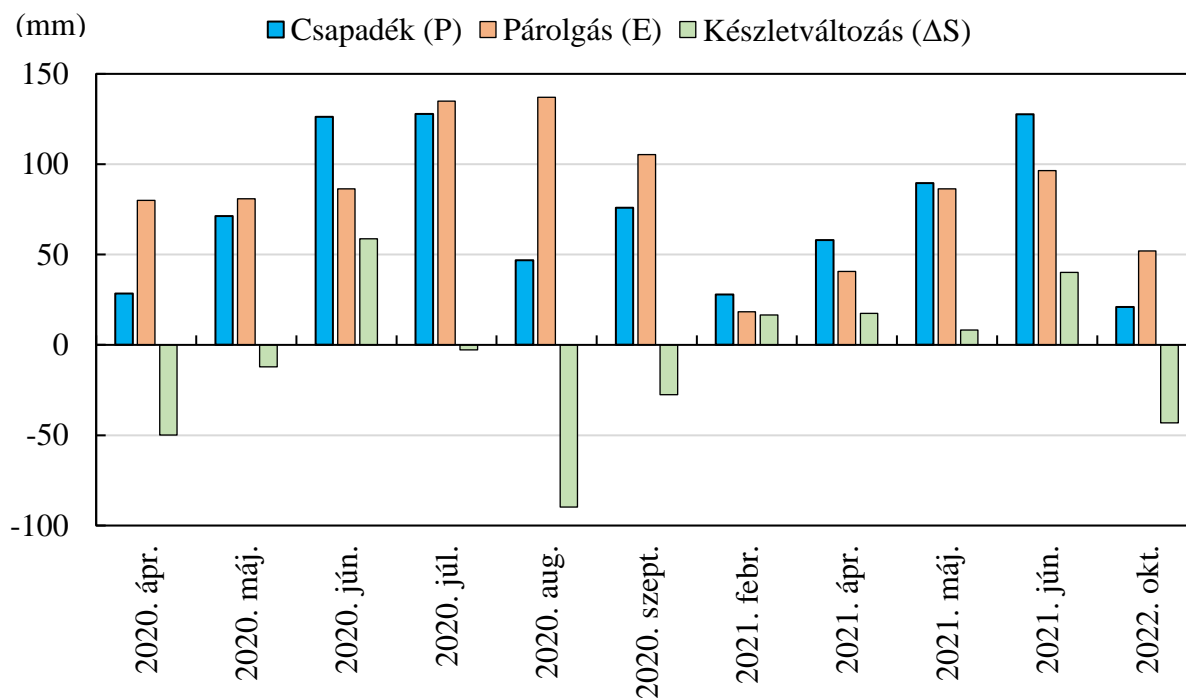


25. ábra. A modellezett változás és a reziduálisok kapcsolata

A tározás napi értékváltozásainak grafikus reprezentációja a 26. ábrán látható. A grafikon a megfigyelt és a modellezett értékek jó átfedését mutatja. A csapadékot, párolgást és vízszintváltozást havi bontásban bemutató hisztogram a 27. ábrán látható (csak a teljes adatsorokkal rendelkező hónapok vannak ábrázolva).



26. ábra. A megfigyelt és modellezett napi vízszintváltozások összehasonlítása a Szent Annánál (Szmolka és Frank, 2022b)



27. ábra. A csapadék, párolgás és vízszintváltozás havi összegeinek hisztogramja (Szmolka és Frank, 2022b)

4.3.2. A tó vízmérleg-vizsgálat eredményeinek értékelése

A csapadék és a párolgás is fontos prediktorai a vízszint-változásnak. A csapadék független változó (CS) 1,04259 értékű együtthatóját értelmezve elmondható, hogy minden 1 mm lehullott csapadék esetén a vízszint 1,04 mm-t emelkedik. Az 1 mm-hez viszonyított 0,04 mm-es többlet származhat csapadékesemények alkalmával megjelenő felszíni hozzáfolyásokból (H), amelyek intenzív esők, vagy olyan folyékony halmazállapotú csapadék alkalmával jelennek meg, amikor a talaj fagyott, ezáltal a talajinfiltráció erősen akadályozott. A csapadékmérő érzékenységet (0,3 mm) nem meghaladó mikrocseppek is hozzájárulhatnak ehhez a különbséghez. A szisztematikus mérési hibák sem kizárhatók, a csapadékmérés a tóparthoz közel történt, a kráteroldal közelsége befolyásolhatta a mérés helyén a lehulló csapadék mennyiségét a tó belső, a kráteroldaltól nagyobb távolságra levő részein lehulló mennyiséghez képest. A csapadék pontosabb mérését csak a mérőeszközöknek a tófelszín középpontjához közelebb történő elhelyezésével lehetne végezni, ez a megoldás a hely turisztikai értéke miatt jelenleg nem alkalmazható.

A párolgás (P) független változó -1,02487 értékű együtthatója egy 2,49%-os eltolódást mutat a várható párolgás és vízszint-csökkenés közti 1:1 arányhoz képest. Ez azt jelenti, hogy a számított evaporációs ráta kisebb, mint a vízszint-csökkenés rátája. A különbség valószínűsíthetően a párolgás-számítások pontosságának a következménye. A számítások alapját képező paraméterek a mérőeszközök mérési pontossága következtében is befolyásolhatják az eredményt, tekintettel arra, hogy a számítás több paraméter értékét is figyelembe veszi (vízfelszín hőmérséklete, léghőmérséklet, relatív páratartalom, szélesség). A kráterben az egyes meteorológiai tényezők értékeinek változatossága jelentős lehet egyazon időpontban, ilyen a szélesség, amely a tó középső részein eltérően alakulhat, mint a mérési helyen, de a vízfelszín hőmérséklete is nagyon eltérő lehet a tó különböző mélységű részein. A számításokhoz használt empirikus képletek is limitált pontosságot biztosítanak.

A konstans tag értéke 0,04662, de tekintettel arra, hogy p értéke nagyobb a szignifikanciaszintnél ($\alpha = 0,05$), nem állítható, hogy ez a valóságban 0-tól eltér. Ez azt jelenti, hogy a mérések alapján nem bizonyítható egy nagyobb mértékű táplálás vagy elfolyás létezése, ami a felszíni és felszín alatti hozzáfolyások, valamint a mélyégi elszivárgás kumulatív hatásaként ($H + H_a - SZ$) értelmezhető (Szmolka és Frank, 2022b). Természetesen kisebb mértékű időszakos felszín alatti hozzáfolyások létezése sem kizárható az eredmények alapján, ugyanakkor az intenzív csapadékok alkalmával megjelenő felszíni hozzáfolyások létezése tény.

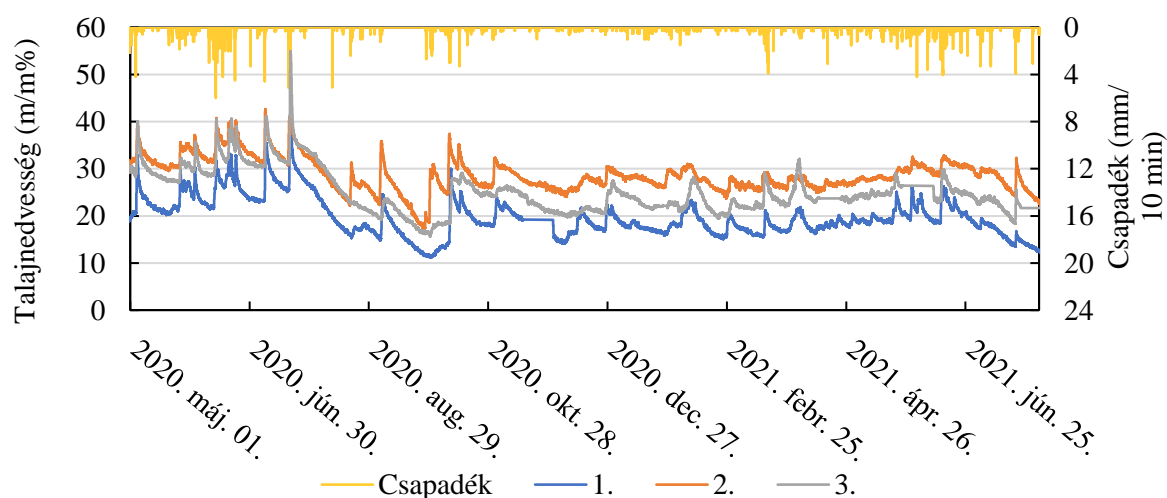
A többváltozós lineáris regressziós analízis eredményei alapján a csapadék és a párolgás a tó tározásában beállt változásokat 96,9%-át magyarázza. A fennmaradó különbség a vízmérleg

többi komponensének hatása által magyarázható. A felszín alatti hozzáfolyás (H_a) és a mélyégi elszivárgás (SZ) létezésének és nagyságrendjének megismerése további kutatásokat igényel. A felszíni hozzáfolyás-eseményeknek, amelyek csak erős intenzitású csapadék vagy gyors hóolvadás alkalmával jelennek meg, az alaposabb megismerése a megjelenés feltételeinek és jelentőség nagyságrendjének tekintetében ugyancsak további vizsgálatok elvégzését feltételezi ugyanúgy, mint a mikrocseppek mennyiségének és hatásainak a tisztázása. A Meyer-képlet (5. képlet) felépítéséből látható, hogy az aktuális párányomás és a telítődési párányomás közt a vízfelszín közvetlen közelében fennálló különbség a párolgás fő befolyásoló tényezője. A kráterbelső relatív páratartalmának alakulása jelentős hatással van a Szent Anna-tó vízmérlegének alakulására. A vízfelszín hőmérséklete, mint a telítődési párányomás meghatározója ugyancsak kulcsfontosságú. A tó víztömege által elraktározott hőmennyiség növekedésével a tó párolgása is növekszik (Szmolka és Frank, 2022b). A vízszint csökkenése egyben a tó területének és mélységének a csökkenését is jelenti, ami a víz hőháztartásában és a tó ökológiai paramétereiben további beláthatatlan változásokat idézhet elő.

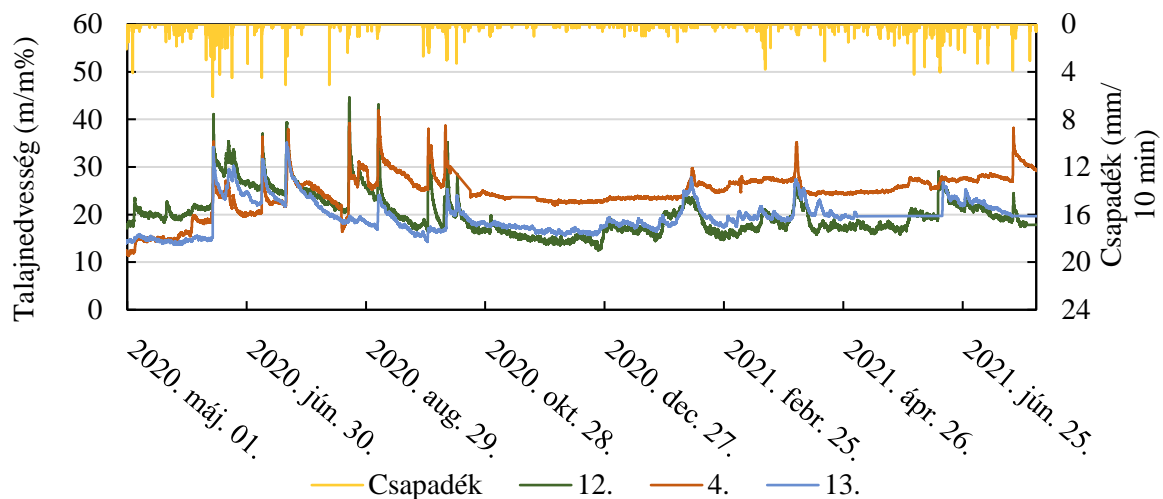
4.4. A szabad víznek a faállományok talajában történő megjelenését vizsgáló kutatás eredményeinek ismertetése és értékelése

4.4.1. A szabad víz megjelenésének vizsgálati eredményei

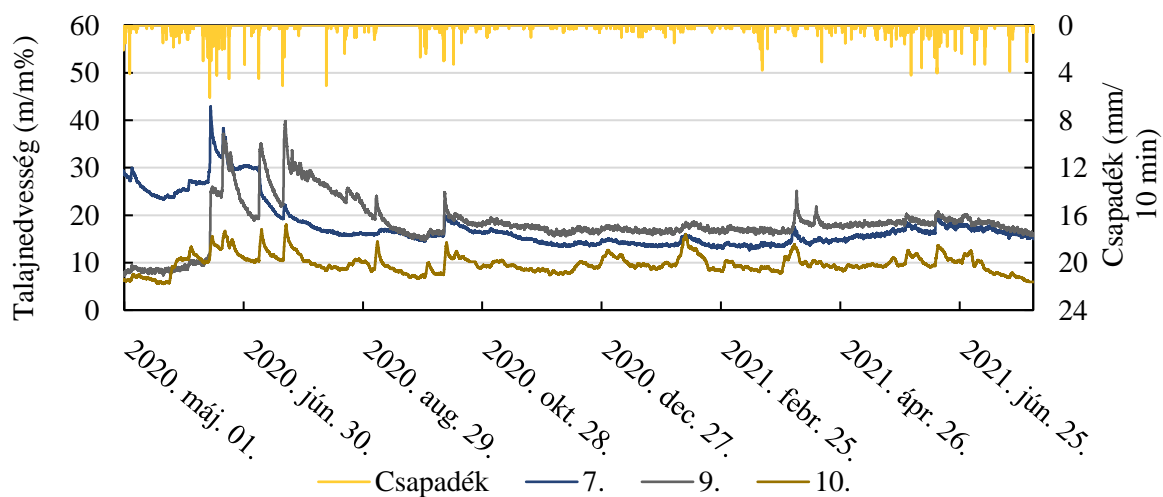
A talajnedvesség alakulása a különböző állományszerkezetek alatt a 28.–32. ábrákon látható. Az szabad víz megjelenését az egyes állománykategóriák mintaterületeinek talajában az adatsorok meredek, hegyes csúccsal jellemezhető kiugrásai és ezt követő gyors visszaesései mutatják.



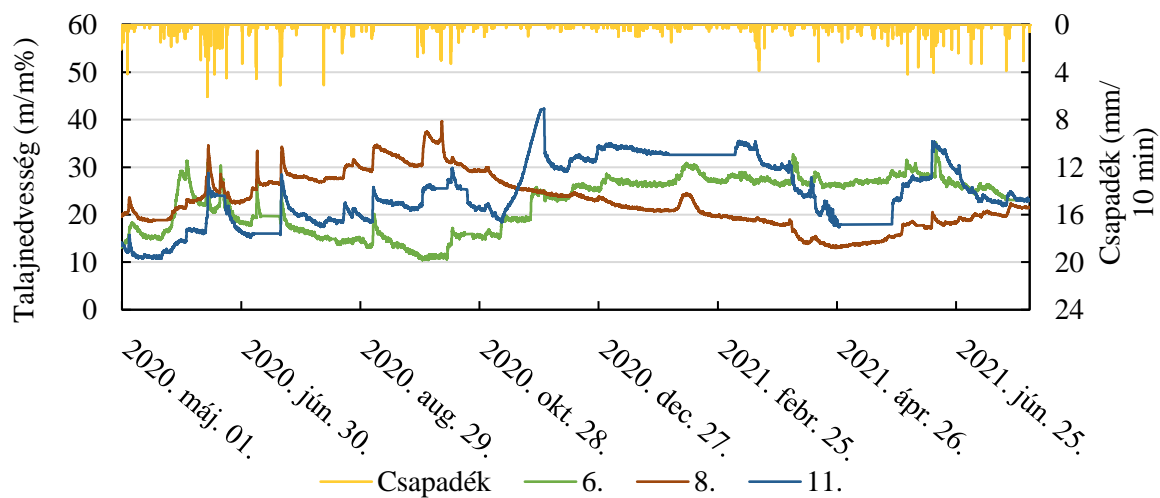
28. ábra. Talajnedvesség alakulása a középkorú bükkös mintaterületeken (Szmolka és Frank, 2022c)



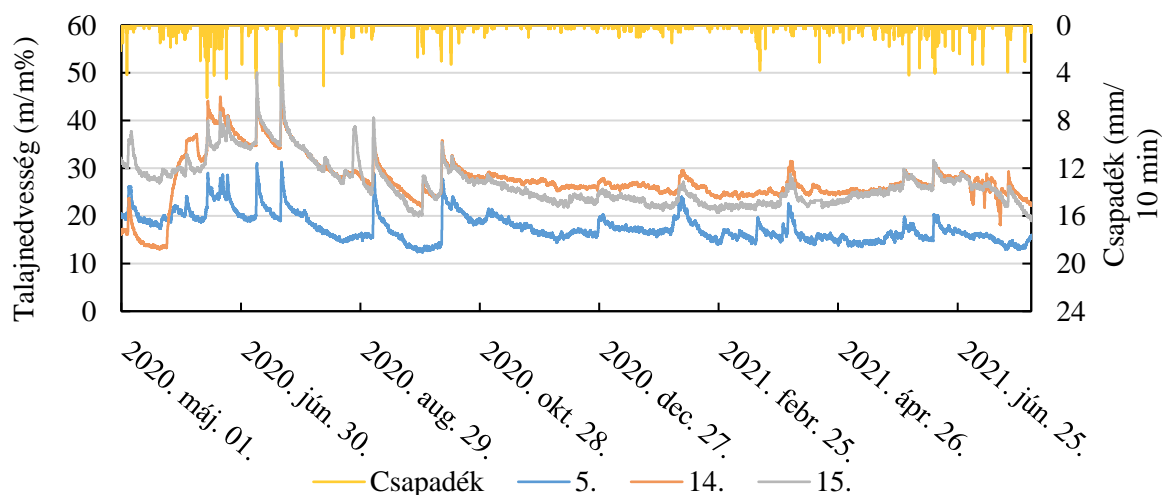
29. ábra. Talajnedvesség alakulása a középkorú lucos mintaterületeken (Szmolka és Frank, 2022c)



30. ábra. Talajnedvesség alakulása az idős bükkös mintaterületeken (Szmolka és Frank, 2022c)



31. ábra. Talajnedvesség alakulása az idős bükkös alatt kialakított lók mintaterületeken (Szmolka és Frank, 2022c)



32. ábra. Talajnedvesség alakulása a vegyeskorú bükkös mintaterületeken (Szmolka és Frank, 2022c)

A mérések kiértékelése alapján azonosított szabad víz megjelenési gyakoriságok az egyes faállomány-kategóriákban a 27. táblázatban vannak feltüntetve. A mintaszámok a fellépő adatvesztések (az adatrögzítők elektronikai hibája, róka, medve általi rongálása) miatt nem egyeznek.

27. táblázat. A szabad víz megjelenési gyakoriságai az egyes fafaj- és állományszerkezet-kategóriákban

Faállomány-kategória	Mintaterület	Igen	Nem	Összesen
Középkorú bükkös	1	21	8	29
	2	16	13	29
	3	15	12	27
Középkorú bükkös, összesen		52	33	85
Középkorú lucos	12	18	11	29
	4	14	14	28
	13	12	13	25
Középkorú lucos, összesen		44	38	82
Idős bükkös	7	10	19	29
	9	11	18	29
	10	12	17	29
Idős bükkös, összesen		33	54	87
Vegyeskorú bükkös	5	16	13	29
	15	17	12	29
	19	19	9	28
Vegyeskorú bükkös, összesen		52	34	86
Lék idős bükkösben	6	13	16	29
	8	12	17	29
	11	12	12	24
Lék idős bükkösben, összesen		37	45	82
Összesen		218	204	422

A szabadföldi vízkapacitást meghaladó talajnedvesség nagyobb mennyiségű csapadékkal jellemezhető esős időszakokban (több mint 7,2 mm/72 óra csapadékösszeg) és hóolvadáskor jelent meg a Szent Anna-tó kráter erdőállományainak talajában (28. táblázat).

Az egyes mintavételekre jellemző eltérő állomány-talajnedvesség-csapadékmennyiség állapotok következtében a minták egymástól függetlennek tekinthetők. Az egyes kategóriákban kijelölt három-három mintaterület szabad víz megjelenési gyakoriságainak homogenitásvizsgálat-eredményei szerint az egyes kategóriákban nem utasítható el a minták homogenitása 5%-os szignifikanciaszinten. Az eredményeket a 29. táblázat tartalmazza. Az egy kategóriához tartozó mintaterületek esetében a szabad víz megjelenési aránya nem függ a mintaterülettől, az egyes kategóriák mintaterületeinek mintavételei egy populációhoz tartozónak tekinthetők, együtt vizsgálhatók a továbbiakban.

A kategóriák szintjén elvégzett függetlenségvizsgálat eredménye szignifikáns 5%-os szignifikanciaszinten, a szabad víz megjelenésének gyakoriságai legalább egy esetben nem függetlenek az egyes kategóriáktól ($X^2(4, 422) = 13,854, p = 0,0078$).

28. táblázat. Szabad víz megjelenés időpontjai és a megelőző 72 óra mért csapadékmennyiségei (a *-gal jelölt események hóolvadással hozhatók kapcsolatba)

Időpont	72 órás csapadék- összeg (mm)	Időpont	72 órás csapadék- összeg (mm)
2020. május 4.	30,2	2020. október 9.	56,7
2020. május 22.	24,3	2020. október 14.	16,9
2020. május 26.	14,7	2020. november 1.	17,3
2020. június 2.	16,2	2020. december 26.	13,5
2020. június 12.	16,8	2021. február 10.*	3,9
2020. június 19.	37,2	2021. február 25.*	0,3
2020. június 20.	44,0	2021. március 16.	14,5
2020. június 22.	32,5	2021. április 2.*	0,4
2020. július 8.	34,5	2021. április 15.	8,1
2020. július 20.	45,1	2021. május 21.	19,8
2020. augusztus 12.	7,2	2021 május 28.	23,8
2020. augusztus 21.	17,1	2021 június 2.	21,9
2020. augusztus 26.	16,6	2021. június 13.	23,1
2020. szeptember 5.	39,9	2021. július 20.	12,6
2020. október 1.	28,8	-	-

29. táblázat. Az egyes fajaj- és állományszerkezet-kategóriák mintaterületeinek X^2 homogenitásvizsgálat eredményei 5%-os szignifikanciaszinten

Faállomány-kategória	szabadságfok	N	X^2	p
Középkorú bükkös	2	85	2,341	0,310
Középkorú lucos	2	82	1,298	0,523
Idős bükkös	2	87	0,293	0,864
Vegyeskorú bükkös	2	86	1,021	0,600
Lék idős bükkösben	2	82	0,396	0,820

A függetlenségvizsgálat páronként elvégzett összehasonlításainak eredményeit összesítő adatokat a 30. táblázat tartalmazza. A párok szerinti összehasonlításhoz a Bonferroni post-hoc teszt korrigált szignifikanciaszintje $\alpha_B = \alpha/10 = 0,005$.

A vizsgálat szignifikáns eredményt mutat az idős bükkösnek a vegyeskorú bükkös kategória, és a középkorú bükkösnek idős bükkös kategóriával történő összehasonlítása esetében. A szabad víz megjelenési gyakorisága nem tekinthető függetlennek attól, hogy melyik kategóriához tartozik. Az idős egykorú bükkösök alatti mérések esetében a szabad víz kisebb gyakorisággal jelent meg, mint középkorú és a vegyeskorú bükkösökben. Ennek értelmében az állomány-szerkezet valamilyen módon hatással van a szabad víz megjelenésére (Szmolka és Frank, 2022c).

30. táblázat. X^2 függetlenségvizsgálat kategóriapáronként végzett összehasonlításainak eredményei. A *-gal jelölt értékek szignifikáns eredményt jelölnek Bonferroni post-hoc korrigált szignifikanciaszinten ($\alpha_B = 0,005$)

Összehasonlított kategóriák	Szabadságfok	N	X^2	p
Középkorú bükkös – középkorú lucos	1	167	0,965	0,326
Középkorú bükkös – idős bükkös	1	172	9,294*	0,002*
Középkorú bükkös – lék idős bükkösben	1	167	4,322	0,038
Középkorú bükkös – vegyeskorú bükkös	1	171	0,009	0,924
Középkorú lucos – idős bükkös	1	169	4,210	0,040
Középkorú lucos – lék idős bükkösben	1	164	1,195	0,274
Középkorú lucos – vegyeskorú bükkös	1	168	0,794	0,373
Idős bükkös – lék idős bükkösben	1	169	0,900	0,343
Idős bükkös – vegyeskorú bükkös	1	173	8,787*	0,003*
Lék idős bükkösben – vegyeskorú bükkös	1	168	3,967	0,046

Nincs szignifikáns különbség a középkorú bükkösök, középkorú lucosok és vegyeskorú bükkösök, valamint az idős bükkösben létrehozott lékek szabad víz megjelenési gyakoriságai között, a lucosokban és bükkös lékekben mért gyakoriságok köztes értékűek az idős bükkös és

a vegyeskorú bükkös kategória, valamint a középkorú bükkös állományokhoz viszonyítva (30. táblázat).

4.4.2. A szabad víz megjelenését vizsgáló kutatás eredményeinek értékelése

A vizsgálat szignifikáns eredményt mutat az idős bükkösnek a vegyeskorú bükkös kategória, és a középkorú bükkösnek idős bükkös kategóriával történő összehasonlítása esetében, ugyanakkor nincs szignifikáns különbség a többi faállomány-kategória közt a páronkénti összehasonlítások eredményei alapján. Az idős bükkös esetében a szabad víz megjelenési gyakorisága elmarad a többi faállomány-kategóriában tapasztalható gyakoriságtól. Ez az eredmény valószínűleg azzal a ténnyel áll összefüggésben, hogy a talajnedvesség alakulása az idős bükkösben eltér a többi kategóriától (28.–32. ábrák), ebben a kategóriában a talajnedvesség alacsonyabb szinten (10–20%) mozog, mint a többi kategóriában (20–30%), ez főleg a 2020. év nyári időszakától kezdődően jól látható.

A kutatás eredményei nem adnak választ a különbséget kiváltó állományszerkezeti okokra, amelyek feltehetőleg az állomány csapadék-intercepciója és transzspirációja által, valamint a talajfelszín párologtatását, az avar víztároló képességét és a talaj szervesanyagtartalmát befolyásolva, a talaj nedvességtartalmának időbeni alakulásán keresztül befolyásolják a szabad víz megjelenésének gyakoriságát (Szmolka és Frank, 2022c). Az állományfelmérések eredményei szerint a koronakezdet-magasság tekintetében az idős bükkös szignifikáns eltérést mutat a középkorú bükkös és a vegyeskorú bükkös állománykategóriák mintaterületeivel történő összehasonlítás során, az utóbbi két kategória közt viszont nem mutathatók ki különbségek a koronakezdet-magasságban. Az idős bükkös magasabb koronakezdet-magassága a törzster klímájának eltérő alakulását válthatja ki a másik két állománykategóriához viszonyítva, így a páratartalom, a légmozgás, a hőmérsékletek alakulása is jelentősen eltérhet az idős bükkös törzsterében, ami hatással lehet a talajnedvesség alakulására.

Nem kizárható, hogy a koronakezdet szignifikánsan nagyobb magassága az idős bükkösben, mint a középkorú bükkösben és vegyeskorú bükkösben, valamint a szabad víz megjelenésének szignifikánsan kisebb megjelenési gyakorisága az idős bükkösben, mint a középkorú bükkös és a vegyeskorú bükkös esetében egymással ok-okozati kapcsolatban vannak, azonban az elvégzett kutatások erre nem szolgáltatnak bizonyítékot. Ennek az összefüggésnek az ellenőrzése állományklíma összehasonlító-vizsgálatok segítségével volna lehetséges, ez alapján válaszokat lehetne keresni arra, hogy a Szent Anna-tó kráterét borító különböző fafaj- és állományszerkezet-kategóriák esetében vannak-e olyan jelentős különbségek az állományok párologtatásában, az állományi csapadék alakulásában, az állomány alatti páratartalom éves

menetében, amelyek a talaj nedvesség-tartalmának változásait és ezáltal a szabad víz megjelenésének gyakoriságában feltárt különbségeket magyarázhatják.

Egyes topográfiai tényezőknek az eredményeket befolyásoló hatása sem kizárható, a kráter sajátos, minden kitétségre kiterjedő alakja, valamint az állományok elhelyezkedése nem tette lehetővé az azonos kitétségű és a kráterlejtőn azonos elhelyezkedésű mintavételi helyek megválasztását. Annak ellenére, hogy a déli és északi lejtők el voltak kerülve a vizsgálat során, az egyes mintavételi helyek közti különbségek a sugárzási mérlegre is kihatnak, a légmozgás jellemzőiben is jelentkezhetnek eltérések, ezáltal az egyes mintaterületeken a párolgási kényszerben különbségek léphetnek fel főleg a vegetációs időszakban.

A mikrodomborzat hatásának csökkentésére a mintavételi helyek kiválasztásánál törekedtem a lokális mélyedéseket vagy kiemelkedéseket elkerülni, de lejtőn történő elhelyezés tekintetében nem volt lehetőség a kráterperemhez viszonyított egyenletes távolság betartására. A homokos, homokos-vályog textúra gyors vertikális irányú beszivárgást tesz lehetővé, a talajnedvesség alakulásában a gravitációs víz megjelenései a csapadékesemények során jelentős késés nélkül következnek be, és ugyanolyan gyorsan szűnnek meg az adatsorok szerint, a késve megjelenő és/vagy lassan megszűnő, többletvízre utaló talajnedvesség állapotok nem kimutathatók az adatsorok alapján. A talajban kis mélységben vízzáró réteg jelenlétére utaló nyomokat nem voltak találhatóak, a kráterbelsőben forrásos, szivárgóvízes helyek létezéséről nincs tudomásom, de ennek ellenére a többletvíz kisebb mértékű megjelenése az egyes mintavételi helyeken nem kizárható, ugyanakkor a talajban található makropórusok is eltérően befolyásolhatják az összegyülekezést az egyes mintavételi helyeken. Ezen tényezők esetleges hatásainak teljes mértékű kizárása a kutatási területen, ennek sajátos, változatos jellege miatt gyakorlatilag nem lehetséges.

A mérések eredményei igazolják a szabad víz megjelenését a Szent Anna-tó belső kráterlejtőinek talajában. A talaj durva, homok, vályogos homok textúrája a gravitációs víz gyors leszivárgását biztosítja az alapkőzet irányába. A szabad víz megjelenése igazolja annak lehetőségét, hogy ez a vízmennyiség a felszín alatti lefolyás által a tó vízmérlegének tápláló komponensét képezheti. Az eredmények alapján valószínűsíthető, hogy létezik ez a vízmérleg-komponens a Szent Anna-tó esetében, azonban a szabad víz megjelenése önmagában nem bizonyítja azt, hogy ennek a vízmennyiségnek a gravitációs komponense a felszín alatti beszivárgás útján a tavat táplálja, ehhez az elszivárgás irányára vonatkozó kutatások volnának szükségesek, amelyek a kráterfalat felépítő piroklasztit rétegek jellemzőit és elhelyezkedését célozzák (Szmolka és Frank, 2022c).

Abban az esetben, ha a felszín alatti hozzáfolyás létezése, mint a vízmérleg tápláló komponense a további kutatások során bizonyítást nyer, az erdőművelési beavatkozások által, a feltárt összefüggések figyelembevételével, a tó vízmérlegére hatást lehet gyakorolni (Szmolka és Frank, 2022c). Az eredmények feldolgozása során feltárt összefüggéseknek a helyi jelentőségén túlmenően általános erdőgazdálkodási és vízgazdálkodási, környezetvédelmi jelentősége is lehet.

5. MEGVITATÁS ÉS JAVASLATOK AZ ERDŐGAZDÁLKODÁSRA

5.1. Következtetések a vizsgálati eredmények alapján

A kutatás eredményei alapján levonható főbb következtetéseket az alábbiakban felsorolás formájában közlöm:

1. A koronarészarányok tekintetében végzett összehasonlítások alapján a középkorú lucosok szignifikánsan kisebb koronarészarány-értékkel jellemezhetők, mint a középkorú bükkösök és a vegyeskorú bükkösök. A statisztikai összehasonlítás tárgyát képező, talajnedvesség-vizsgálatok mérési helyein a középkorú lucos mintaterületek 25,1–36,9%-os koronarészaránnyal jellemezhetők, az idős bükkös mintaterületek átlagai is alacsonyabbak (38,2–41,2%) de nem minden esetben különböznek a középkorú és vegyeskorú bükkösök koronarészarányaitól. A középkorú bükkös állománykategória magas koronarészaránnyal jellemezhető (51,5–57,1%), a vegyeskorú bükkös mintaterületekben a legmagasabbak a koronarészarányok (a mintaterületek átlagai 58,6%, 65,4% és 65,8%), a magas koronarészarány itt egyértelműen a vegyeskorú szerkezet változatos átmérő és famagasság-eloszlással jellemezhető, egyenetlen lombosítvának következménye. Annak ellenére, hogy a koreloszlás tekintetében különböző állományokról van szó, a koronarészarányok tekintetében a középkorú bükkös, az egykorú bükkös és a vegyeskorú bükkös állománykategóriák esetében nem mutatható ki szignifikáns eltérés egyetlen mintaterület esetében sem. A koronarészarány meghatározza a koronaterület függőleges kiterjedését, befolyásolva a koronaretenció mértékét, hőmérsékletet, páratartalmat, légáramlást, a különböző koronarészaránnyal jellemezhető állománykategóriák eltérően befolyásolhatják a kráter topoklimáját és talajnedvesség-viszonyait.
2. A koronakezdet-magasság a törzstér vertikális kiterjedését tükrözi. A vizsgálati eredmények alapján elmondható, hogy az idős bükkös koronakezdet-magassága szignifikánsan nagyobb, mint a középkorú bükkös és a vegyeskorú bükkös esetében, ez utóbbi két kategória közt azonban nincs szignifikáns eltérés. A középkorú lucosok esetében koronakezdet-magasság szignifikánsan magasabb, mint a középkorú bükkös mintaterületek esetében. A koronakezdet-magasság értékek szignifikáns eltérései főleg az azonos fafajú, hasonló biológiai felsőmagassággal jellemezhető idős bükkös és vegyeskorú bükkös állománykategóriák összehasonlításában fejeznek ki egyértelmű állományszerkezeti különbséget, de különbözik az állományszerkezet az eltérő biológiai felsőmagassággal és ennek ellenére hasonló koronakezdet-magassággal jellemezhető középkorú bükkös és a vegyeskorú bükkös mintaterületek esetében is. A Szent Anna-tó kráterének

vizsgált állományaiban a középkorú lucosok és az idős bükkösök törzstere magasabb, nyitottabb, mint a középkorú és vegyeskorú bükkösök törzstere. Az újulati-szint csak a vegyeskorú állományok mintaterületeinek esetében jelenik meg, ezáltal tovább csökkentve a törzstér áttörtségét. A törzstérben a páratartalom és a légáramlásviszonyok jelentősen eltérhetnek a koronaterhez képest, a talaj nedvességviszonyai is eltérően alakulhatnak a különböző koronakezdet-magasság viszonyok mellett, ezáltal az egyes kategóriák állományklímája és a kráterben kifejtett hatásuk is különbözhet.

3. A talajinfiltrációs vizsgálatok eredményei kimutatták, hogy az erdők esetében az állandósult talajinfiltráció-sebesség nagyon magas, a középkorú lucosok 727 mm/h-t és az idős bükkösök 620 mm/h-t meghaladó átlagértékkel jellemezhető. Az idős bükkösben létrehozott lékek esetében, alacsonyabb, de besorolását tekintve itt is a nagyon magas infiltrációs sebesség kategóriába tartozó, 355 mm/h értéket meghaladó átlaga van az állandósult infiltrációs rátának. Tekintetbe véve, hogy a különböző állományszerkezetek alatt a beszivárgás sebességének átlaga nagyobb, mint a Románia területén mért legnagyobb csapadékintenzitás, amely a Curtea de Argeş településen 1947. július 7.-én mért, világszinten is vezető érték, 206 mm 20 perc alatt (Maidment, 1993), ami átszámítva 618 mm/h-t jelentene, kijelenthető, hogy erózióvédelmi szempontból az erdők hatékony védelmet biztosítanak a kráterben, a kis területű, a vizsgálat során tanulmányozott bükkös lékek és az ezekhez hasonló természetes bolygatások is megfelelő védelmet biztosítanak a felszíni vízfolyások kialakulásával szemben.
4. Az erdők esetében mért állandósult infiltrációs ráták szignifikánsan magasabb értékűek, mint az egyéb vizsgált felszínborítási kategóriák, nevezetesen a gyepek és a földutak rátái. A gyepek állandósult beszivárgási sebességének átlagértéke (171,9 mm/h) a magas infiltrációs sebesség kategóriába sorolható, de több mintavételi hely esetében is kevésbé kedvező, alacsony (5,1–30 mm/h) és közepes (30,1–70 mm/h) infiltrációs-sebesség volt mérhető. A gyepeken már sokkal nagyobb valószínűséggel kialakulnak a felszíni vízfolyások, mint az egyes faállományok alatt. A földutak esetében, annak ellenére, hogy az átlag a közepes infiltráció-sebesség kategóriába sorolható, a minták nagy része a nagyon alacsony (1,1–5,0 mm/h) és az alacsony kategóriában helyezkedik el. A felszíni vízfolyások kialakulásáért és az ezek által végzett hordaléktranszportért egyértelműen a földút és a gyepek földhasználati kategóriák felelősek.
5. Erős negatív korreláció volt kimutatható az állandósult infiltrációs ráta és a talaj tömörsége között ($r(49)=-0,6184$, $p<0,001$). A penetrométeres vizsgálat átlagosan 16,1 kg/cm² ellenállást mutatott a gyepek és 18,3 kg/cm² értéket a földutak esetében. Ezek

az értékek több, mint háromszorosát jelentik a középkorú lucosok talaján mért átlagos tömörségnek ($4,4 \text{ kg/cm}^2$) és kétszeres értéket képviselnek az idős bükk ($8,0 \text{ kg/cm}^2$) és az idős bükkösben létrehozott lécek ($8,3 \text{ kg/cm}^2$) értékeihez képest. Annak ellenére, hogy a talaj textúrája laza, homok, vályogos–homok, a kráterben minden földhasználati kategóriában, az antropogén hatásnak nagymértékben kitett területeken a talaj tömörsége jelentősen nagyobb, ami az állandó taposásnak az eredménye. Ez az emberi hatás ilyen módon az erózió és ezáltal a tó szedimentációjának fő előidézője a Szent Anna-tó kráterében.

6. A vízmérleg vizsgálatok eredményei alapján a tó felszínére hulló direkt csapadék és a párolgás a fő vízmérleg-befolyásoló paraméterek, ezek a Szent Anna-tó víztározásában megjelenő, a vízszint-változásként kifejezett varianciát 96,9%-ban magyarázták a vizsgálati időszak alatt. Ennek alapján kijelenthető, hogy a vízmérleg többi komponense, a felszíni hozzáfolyás, a felszín alatti hozzászivárgás és a mélységi elszivárgás szerepe jelentősen kisebb a Szent Anna-tó esetében. Az a megállapítás, hogy a többváltozós lineáris regresszió módszerével meghatározott vízmérleg egyenlet (11. egyenlet) alapján a csapadék és a párolgás a fő szabályozó tényezők, a tó klímaváltozással kapcsolatos érzékenységre mutat rá. Tekintettel arra, hogy várhatóan a csapadék csökkenni, a párolgás növekedni fog a klímaváltozás hatására, a tározásban bekövetkező veszteségek mérséklése érdekében a párolgás csökkentésére és a felszín alatti hozzáfolyás növelésére volna szükség a tó batimetriai jellemzőinek fenntartása érdekében. Ez a tény a kráterben található faállományok szerepére világít rá a relatív páratartalom növelésének, a szélsebesség csökkentésének és a felszín alatti hozzászivárgás növelésének lehetősége tekintetében.
7. A felszín alatti hozzászivárgás kérdésével kapcsolatos gravitációs víz létezésének kérdése tekintetében a vizsgálatok kimutatták ezeknek a szabadföldi vízkapacitást meghaladó talajnedvesség-tartalom értékeknek a megjelenését a Szent Anna-kráter belső lejtőin található faállományok talajában. A szabad víz megjelenik a kráterbelső talajában az egyes állományok alatt, a gyökérszót meghaladó, 50 cm-es mélységben, nagyobb mennyiségű csapadékkal jellemezhető esős időszakokban és hóolvadáskor. A 2020. május 1. és 2021. augusztus 1. közötti vizsgálati időszakban nem túl gyakran, de a legkisebb gyakoriságot mutató idős bükkös állomány alatt is legkevesebb 10 alkalommal lehetett kimutatni a szabad víz megjelenését egy-egy mintaterületben. A legtöbb ilyen eseményt a középkorú bükkösben, 21 alkalommal, illetve a vegyeskorú bükkös állomány esetében lehetett kimutatni, a vizsgálati időszak alatt legtöbb 19 alkalommal. A

vizsgálat során használt szenzorok csak a gravitációs víz megjelenését tudták kimutatni, a gravitációs víz mennyiségének becslése nem volt elvégezhető. Tekintetbe véve a kráterbelső, mint vízgyűjtő terület (183,6 ha) és a tó (18,9 ha) területarányát (9,7:1), kismértékű felszín alatti hozzászivárgás is jelenthet a tó számára értékes víztöbbletet.

8. A szabadterületi vízkapacitást meghaladó talajnedvességek megjelenésének gyakoriságában eltérések voltak kimutathatók az egyes állományok esetében. A X^2 függetlenségvizsgálat eredményei alapján elmondható, hogy a szabad víz megjelenésének gyakorisága nem tekinthető függetlennek attól, hogy melyik faállományhoz tartozik a mintaterület. Jelentősen gyakrabban jelent meg a szabad víz a középkorú bükkösben, mint az idős bükkösben és ugyanez mondható el a vegyeskorú bükk állomány és az idős egykorú bükkös esetében végzett összehasonlítás tekintetében is. Ugyanakkor nem igazolható ez a különbség a középkorú bükkösök, középkorú lucosok és a vegyeskorú bükkös között. Az idős bükkösben létrehozott lékek és a középkorú lucosok esetében a mért gyakoriságok köztes értéket képviselnek az idős bükkös és a középkorú bükk állományokhoz viszonyítva. A vizsgálati eredmények nem adnak választ a különbségeket kiváltó okokra, ezek feltételezésem szerint összefüggésben lehetnek az állomány csapadék-intercepciójával, transzspirációjával, a törzstér légáramlási viszonyaival, az avar víztározó képességével, ezeknek az egyes állományszerkezetek esetében eltérő a tulajdonságoknak a hatására a talaj nedvességtartalmának időbeni alakulásán keresztül befolyásolják a szabad víz megjelenésének a gyakoriságát. Az állományszerkezet alakításával a szabad víz megjelenésének gyakorisága, és ezzel egyenesen arányosan a mennyisége is befolyásolható. A talaj homok, vályogos-homok fizikai félesége a gravitációs víz gyors leszivárgását biztosítja az alapkőzet irányába, ez ugyanakkor azt is jelenti, hogy ez a víz a fás növényzet számára a továbbiakban már nem hasznosítható mennyiséget képez.

5.2. Az erdőgazdálkodási javaslatok megalapozása

Az erdőgazdálkodást a Szent Anna kráterben a tó hosszútávú fenntartási céljával összehangoltan szükséges végezni. Annak ellenére, hogy a hatályos üzemterv védelmi elsődleges rendeltetést határoz meg (források és egyéb vizek környezetében található erdők, egyéb természetvédelmi területen található erdők), az üzemtervi előírások nem tartalmaznak olyan előírásokat, amelyek célirányosan a tó védelmi szempontjait helyezik előtérbe, azon túl, hogy megszokott ápolásokat és nevelővágásokat írják elő a fiatal és középkorú állományokban, valamint konserváló vágásokat javasolnak az idős erdőkben.

A természetvédelmi kezelési terv (Környezetvédelmi Minisztérium 1408/2017 rendelete) előírásai is minimálisak a Szent Anna-tó vízminőségével és vízmérlegével kapcsolatosan, a fürdőzés betiltása, illetve minden olyan tevékenység tiltása, ami a felszíni vagy felszín alatti hozzáfolyást csökkentené, jelentik az egyetlen cselekvési tervben feltüntetett, a Szent Anna-tóra vonatkozó előírást. A felszíni hozzáfolyások tekintetében ez az előírás a hordaléktranszport okán csak a hóolvadás során az állományok fagyott talajáról történő felszíni hozzáfolyás tekintetében elfogadható, a gyepek és földutak tekintetében a kezelések más irányúak kell legyenek.

A kutatásaim eredményeit figyelembe véve, illetve a tóval kapcsolatos szakirodalmi forrásokban fellelhető egyes megállapítások alapján a Szent Anna kráterben az erdőgazdálkodási javaslatok megalapozása érdekében a következő főbb szempontokat fogalmazom meg:

1. A faállományok erózióvédelmi szerepét meg kell őrizni, a felszíni lefolyások kialakulását elősegítő talajtömörödést meg kell akadályozni az erdőgazdálkodás során, a fagyott talajviszonyok melletti hóolvadásból történő felszíni hozzáfolyások elősegítése célszerű, de a hordaléktranszport minimalizálásával;
2. A tó vízmérlegét tekintve a felszín alatti hozzászivárgás komponens támogatása javasolt az állományok alatti talajinfiltráció mennyiségi növekedésének az elősegítése által;
3. A relatív páratartalom magasabb értékeinek és a léghőmérséklet alacsonyabb értékeinek elősegítése szükséges a kráterben a vízmérleg párolgás komponensének csökkentése érdekében, a tó partjának közelében, az állományok magas evapotranszpirációja által, főleg a nyári és őszi időszak folyamán;
4. Meg kell vizsgálni szélesség csökkentésének lehetőségét a kráterben a vízmérleg párolgás komponensének csökkentése érdekében, ez meglátásom szerint az állományok széllel szembeni ellenállásának növelése és a napos kitettségű kráteroldalak felmelegedésének a csökkentése által a hőmérsékleti gradiensek minimalizálásával segíthető elő a kráterben;
5. A tó körüli erdőszél védelmi szerepének a növelése szükséges a biomassza szél általi behordásának csökkentése érdekében;
6. Tekintettel arra, hogy a teljes terület természetvédelmi kategóriát képez, minden beavatkozás természetvédelmi kezelésnek minősül, a tó megóvása és fenntartása mellett az erdők természetességét is meg kell őrizni.

Az erózióvédelmi szerep megőrzése tekintetében, amint azt az állandósult infiltrációs ráta átlagértékei bizonyítják, a faállományok alatt a kráter magas átteresztőképességű talajában az infiltráció sebessége nagyon gyors, a 2–3 állománymagasságot nem meghaladó átmérőjű lécek

sem növelik jelentősen az felszíni folyások kialakulásának kockázatát. Az állományok záródásának tekintetében a nevelővágások vagy esetleges felújítóvágások, konzerválóvágások során a záródás csökkentése nem növeli az erózió veszélyét. A nagyterületű tarvágások kérdése nem merülhet fel, esetlegesen valamilyen nagymértékű bolygatás (katasztrófa) esetében. Természetesen ilyen események során a károk felszámolása és az erdő felújítása erdőgazdálkodási beavatkozások által a legrövidebb idő alatt meg kell történjen. Annak ellenére, hogy a nagyobb méretű bolygatások, katasztrófák is a természetesség fogalmához tartoznak az ökoszisztémák működése szempontjából (Bartha, 2012a), a tó fenntartása képezi az elsődleges védelmi célkitűzést, ezért az erdő erózióvédelmi rendeltetésének gyors helyreállítása elsőbbséget kell élvezzen.

Az erózióvédelmi szerep tekintetében az erdőgazdálkodással kapcsolatos problematika része a kráterben megtalálható közelítőutak használata, illetve a közelítőhálózat bővítésének a kérdése. A közelítőnyomok felszínborítás tekintetében a földút kategóriát képviselik, amely kategória esetében a vizsgálatok eredményei az állandósult infiltrációs ráta átlagértékét a közepes (30,1-70 mm/h) infiltrációsebesség kategóriába sorolták, de sok mérési hely esetében az érték nagyon alacsony (1,1–5,0 mm/h). A közelítőnyomok legnagyobb hosszanti dőlése nem haladhatja meg a 10%-ot, amely alatt az erózió a talaj kis mélységére korlátozódik (Bereziuc et al, 1987) és könnyen megállítható.

A felszín alatti hozzászivárgás komponens támogatásának kérdése az állományok alatti talajinfiltráció mennyiségi növelésével összetett problematika, a szabadföldi vízkapacitást meghaladó nedvességtartalom megjelenési gyakorisága a kráter idős egykorú bükkös mintaterületei esetében szignifikánsan alacsonyabb, mint a középkorú bükkös, illetve a vegyeskorú bükkös esetében. A feltárt eredmények azt sejtetik, hogy felszín alatti beszivárgás – mint a Szent Anna-tó vízmérleg-komponense – szempontjából nem lehet a gazdálkodás célja az egykorú elegyetlen idős bükkösök létrehozása a kráterben.

A csapadék hasznosításának kérdésével számos kutatás foglalkozik. Führer (Führer, 1992) a lombos fajokat hidrológiai szempontból kedvezőbbnek ítéli meg, mint a fenyőket. Ezt azzal is magyarázza, hogy télen – amikor a vegetáció vízfelhasználása elenyésző – a lombos állományok csapadékvisszatartása jóval kisebb, vizsgálatait alapján éves szinten a bükk intercepciója (a szabadterületi csapadék 16%-a) 20%-kal kisebb, mint a luc esetében (36%). A szabadterületi csapadékhöz képest az avar és a humusz-szinten keresztül a bükkösben a csapadék 54%-a szivárog be a talajba, míg a luc esetében ez 42%. A vegetációs időszakban a bükk 20%-os és a luc 34%-os intercepcióval volt jellemezhető. A május-október időszakra vetítve teljes záródású

állományokban Kucsara (Kucsara, 1998) vizsgálatai alapján a fiatal bükkös intercepciója 29%, a fiatal lucos esetében 38%, középkorú lucos esetében 36,7% volt. A vegetációs időszakot tekintve kisebb, 10% körüli eltérést mutat mindkét kutatás. A gravitációs víz megjelenésének kevesebb alkalommal történt előfordulása idős egykorú bükkösben a vizsgálati időszak alatt ellentmondásosnak tűnhet tekintetbe véve a bükk kisebb intercepcióját a fenyőfélékhez képest.

A paleolimnológiai kutatások (Magyari et al., 2009) eredményei a Szent Anna-tó esetében a vízmélység-növekedést a luc dominanciájának irányából a lombos fajok (gyertyán és bükk) dominanciájának irányába történő fafajösszetétel-változással, a sekélyebb vízmélységeket pedig a luc dominanciájával hozzák összefüggésbe, a bükk és a gyertyán megtelepedését ugyanakkor a tó vizének növekvő produktivitása követte, gyorsabb üledékakkumulációval, a lucfenyő dominanciájával jellemezhető időszakokban pedig az alacsony tó-produktivitás volt jellemző.

Valószínűsíthető, hogy a lucosok és a bükkösök a jelenben is hasonló irányban befolyásolják a tó produktivitását, ami a bükk–luc elegyeket illeti, a tó produktivitását tekintve köztes hatásúak lehetnek az egyik vagy másik faj dominanciájával jellemezhető állományösszetételhez képest a tó kráterében.

A saját kutatási eredmények és a szakirodalmi források alapján azt a következtetést tudom levonni, hogy az elegyetlen idős bükkösök hatása a kráterben a vizsgálatom eredményeit tekintve batimetriai szempontból vitatható, a kráterben jelenlétük az erdőgazdálkodás produktuma, és az is kizárható, hogy a holocén vízszintnövekedések elegyetlen, egykorú, idős bükkösökként jellemző faállomány-szerkezetekhez köthetők.

Háborítatlan erdőállományokban a koreloszlással összefüggésében a méreteloszlás változatos, elméletileg szabályos, exponenciálisan csökkenő eloszlást mutat, a valóságban az elméleti eloszláshoz képest hol pozitív, hol negatív anomáliákat mutat az egyes méretcsoportokban, amelyek az egyes fejlődési szakaszok területarányaiból, termőhelyi viszonyaiból és egyes biotikus, illetve abiotikus külső hatásokból (széldöntés, magtermés elmaradása stb.) vezethetők le (Standovár, 1996).

Abból kiindulva, hogy az első jól elhatárolható erdőirtás 1100 évvel ezelőtt jelenik meg a kráterben (Magyari et al., 2006), ezt megelőzően csak gyenge emberi hatással kell számolni a kráterben, az erdők természetessége gyakorlatilag teljes volt, ami a háborítatlan erdőállományokra jellemző vegyeskorú szerkezetet feltételez, az egykorú bükkösök kialakulásának nem voltak adottak a feltételei.

A lombos fajok avarjának tó-produktivitást növelő hatása jelenleg is érvényesülni tud, az egykorú, idős, elegyetlen bükkösök kialakítása és fenntartása a felszín alatti hozzászivárgás vízmérleg-komponens, a tó vizének produktivitása és a természetesség szemszögéből sem javasolt a Szent Anna-tó kráterében. Ez a megállapítás a középkorú bükkösök kérdését is eldönti pár évtized távlatában.

A középkorú, teljes záródású lucosok fenntartása vagy kiterjesztése, amelyek esetében valamivel több szabad-víz megjelenés volt a vizsgálat alatt, de az idős egykorú bükkössel történő összehasonlításban a különbség statisztikailag nem kimutatható, szintén nem lehet a gazdálkodás célja a teljes kráterben. A luc a kráterben található laza, homokos textúrájú andoszol típusú talajon koronggyökérzete révén egyrészt a széldöntés veszélyének fokozottan kitett állományokat képez, másrészt a teljes záródású állományok magas téli csapadék-intercepciója miatt az állományok alatt kisebb hómennyiség tud felhalmozódni, mint a téli lombtalan állapotban sokkal kisebb intercepciójú lombos állományok alatt. Tekintettel arra, hogy a fenyvesek esetében a koronáról szublimáló hómennyiség a teljes hullott hómennyiség 20–30%-át is képezheti (Montesi et al., 2004), a hónap a tó vízmérlegének szempontjából vélhetően fontos, fagyott talajon történő felszíni hozzáfolyás általi hasznosulása kevésbé érvényesülhet a teljes záródású egykorú lucosok állományainak esetében.

A vizsgált vegyeskorú bükk állományok esetében az idős egykorú bükkössel történő összehasonlításban statisztikailag szignifikánsan többször jelent meg gravitációs víz a talajban. A vegyeskorú bükkös állományszerkezetnek, luc és jegenyefenyő elegyedésével, az előtérbe helyezése az erdőgazdálkodás során a Szent Anna-tó kráterében a vizsgálataim során kimutatott nagyobb szabadvíz gyakoriságok mellett olyan szempontból is érdekes lehet, hogy az elegyes állományok nagyobb ellenállóképességük a környezeti tényezők hatásaival szemben (Paul et al., 2019).

Az erdőben megjelenő bolygatások, az erdőgazdálkodás során végzett záródáscsökkentések (gyérítések stb.) vízkészletekre gyakorolt hatását vizsgáló kutatások megállapításai is változatosak. Általánosan elmondható, hogy a csökkenő erdőterülettel növekszik a vízgyűjtők vízhozama és az egyes erdőgazdálkodási műveletek nagyon eltérő hatásúak a tartamos vízhozamra nézve (Szodfridt, 1996). A bolygatásokat követően megjelenő vízhozam növekedések mértékében az egyes tanulmányok eltérő eredményekről számolnak be (Goeking és Tarboton, 2020, Campo et al., 2022). Az erdő és egyéb vegetációformák összehasonlításában az erdő árnyékoló, szélvédelmi hatása, valamint az avartakaró révén a talajról történő evaporációt korlátozza, ennek ellenére összességében az intercepció és evaporációs veszteség az erdőben a legnagyobb,

aminek következtében a talajba jutó vízmennyiség az erdő alatt kevesebb mint más, füves vegetációformák esetében, az erdő nagyobb vízfogyasztó (Szodfridt, 1996). Az erdő záródásának csökkentésével kevesebb lesz az intercepciós veszteség (párolgás és szublimáció csökkenése) és a transzspiráció is kisebb lesz a fák pusztulásának vagy eltávolításának következtében, ezáltal a vízhozamok növekednek, de vannak olyan kutatási eredmények is, amelyek egyes esetekben a vízhozamok csökkenését mutatják ki a bolygatást követően, amit azzal magyaráznak, hogy a koronaszint alatti vegetáció megnövekedett evapotranszspirációja túlkompensálhatja a koronaszint evapotranszspirációjának csökkenését (Goeking és Tarboton, 2020). Ez utóbbi megállapítás érdekes lehet a vegyeskorú állományok értékelése tekintetében.

A záródás csökkentését célzó erdészeti beavatkozások egyik kulcskérdése ezek intenzitása. A vízhozamok szignifikáns növekedéséhez Campo és munkatársai (Campo et al., 2022) szerint 40–60%-os erélyű beavatkozások szükségesek. A vízhozamban kimutatható válasz gyakorlatilag azonnali, hatása átlagosan 3 és 8 évig mérhető, de mértéke számos tényezőtől függ, a vízhozam érdekében végzett gyérítéseket érintő döntéshozatal a helyi környezeti körülmények és a jövőbeni klímaváltozás várható hatásainak függvényében kell történnjen. A szerzők szerint a vízhiányos állapotok esetén a gyérítések által az állomány rezilienciája növelhető, hidratációs szintje növekszik. A vegyeskorú szerkezeteknek hidrológiai szempontú összehasonlítása az egykorú állományokhoz képest egy kevésbé kutatott terület, egyértelmű, általánosan elfogadott következtetések ebben a tekintetben nem ismeretesek.

A felszín alatti hozászivárgás vízmérleg komponens növelése gyakorlatilag az intercepció és az evapotranszspiráció csökkentésével megvalósítható a kráterben. Tekintettel arra, hogy egy térség levegőjének páratartalma az evapotranszspirációból és a távolabbi tájakról érkező páradvekczióból ered (Vig, 1995), a kráter faállományainak evapotranszspirációja a kráter kis mérete (202,5 ha) és sajátos tölcser alakja következtében feltehetően jelentős hatással van a kráter relatív páratartalmára, és ezáltal a légkör páraéhségén keresztül a tó párolgására is. A kráterben található faállományok állományklímájának és evapotranszspirációjának vizsgálatára a műszerezettség és a ráfordítható idő hiányában nem adódott lehetőségem a Szent Anna-tó kráterében, a faállományok szerkezetével kapcsolatosan azonban az egyes állományok párologtatására ezek folyónövedékéből is következtethetünk. Az erdő évi vízfelhasználását az évi összes szervesanyagtermelés és az egységnyi szervesanyag-képzéshez szükséges vízmennyiség szorzataként lehet megbecsülni, az évi szervesanyag-képzést a faállomány növedékének, évi lombjának és gyökernövedékének összsúlyát jelenti. A luc és a bükk esetében az 1 tonna szárazanyag képzéséhez szükséges vízmennyiség 231 tonna, illetve 169 tonna (Járó, 1981). Tekintetbe véve a

kráterben található lucosok folyónövedékét, amely az általam felmért mintaterületek esetében meghaladta a $16 \text{ m}^3/\text{ha}$ értéket hektáronként, ennek $0,45 \text{ t/m}^3$ száraz (15%) térfogattömegét (Giurgiu et al., 2004), illetve éves avarjának mennyiségét, amely a fenyők esetében meghaladja a $4,5 \text{ t}$ szárazanyagot (Koloszár, 1990) a Szent Anna-tó kráterében található elegyetlen lucosok évi szárazanyagtermelése eléri a $11,7 \text{ t/ha}$ értéket, ami 2700 tonna körüli víz transzspirációját jelenti hektáronként. A középkorú és idős egykorú bükkösök transzspirációja, $9 \text{ m}^3/\text{ha}$ körüli folyónövedékét $0,67 \text{ t/m}^3$ száraz (15%) térfogattömegét (Giurgiu et al., 2004) és $3,6\text{--}4,5 \text{ t/ha}$ avarmennyiségét (Koloszár, 1990) figyelembe véve, $1600\text{--}1800$ tonnát jelent hektáronként a Szent Anna-tó kráterében. Ezeknek az értékeknek az alapján a lucosok $50\text{--}40\%$ -kal nagyobb transzspirációval jellemezhetők, ezért a kráter páratartalmának a növelése szempontjából vélhetően előnyösebbek, mint a bükkösök. A bükk–luc-jegenyefenyő elegyek köztes értékkel rendelkezhetnek az elegyetlen bükkösök és lucosok értékeihez viszonyítva.

A transzspiráció és az ezekben végzett erdőgazdálkodási beavatkozások tekintetében az egyes kutatások eltérő eredményeket szolgáltatnak. A gyérités hatására a transzspiráció szignifikáns növekedését mutatták ki Bréda és munkatársai (Bréda et al., 1995) egy franciaországi, 43 éves elegyetlen kocsánytalan tölgyesben, úgy az egyes fák, mint a faállomány szintjén, amelyet a magasabb víz- és sugárzási energia-hozzáférhetőséggel magyaráznak. A gyéritett (23% -os beavatkozási erély a törzsszám, 35% a körlapösszeg vonatkozásában) állomány alacsonyabb intercepciója következtében a talaj hozzáférhető vízmennyisége a gyéritett területen magasabb volt, a deficit időszak a beavatkozást követő első évben mindkét állományban 80 napos, a második évben a kontroll állományban 57 , a gyéritett állományban 35 napos volt. 50 éves erdőfenyő–luc elegyben végzett 24% -os körlapösszeg-csökkentéssel jellemezhető erélyű gyérités vizsgálatával Lagergren és munkatársai (Lagergren et al., 2008) a transzspiráció csökkenését mutatták ki a gyéritett területen a kontrollhoz képest. A beavatkozást követő második évben a gyéritett állomány transzspirációja 20% -kal meghaladta a kontroll állomány transzspirációját. Északnyugat-kínai *Larix principis-rupprechtii* ültetvényben végzett, különböző intenzitású gyéritések hatásait vizsgálva a korona-intercepció csökkenése mellett a faállomány transzspirációjának a csökkenését, az állomány alatti (talaj, lágyszárú- és cserjeszint) transzspirációjának a növekedését mutatták ki (Xu et al., 2020), de az erdő össz-evapotranszspirációjának tekintetében a gyéritett állományok kisebb értékkel voltak jellemezhetők mint a kontroll-terület. Az állományi csapadék tekintetében a nagyon erős (53%) intenzitású gyéritések növelték a talaj víztartalmát. A kutatás pozitív kapcsolatot mutatott ki az állomány transzspirációja és levélfelület-indexe, negatív kapcsolatot a levélfelület index és a lefolyás között.

A világszinten a témában végzett kutatások eredményei által feltárt különböző irányú és intenzitású hatásokat tekintve, a Szent Anna-tó esetében sem lehet egyértelműen megjelölni az egyes záródáscsökkentési beavatkozások hatásait, ezeknek intenzitásait és megoszlását a talaj víztartalékjaira, ezáltal a tó felszín alatti hozzászivárgás-komponensére, az állományok transzspirációjára és ezáltal a párolgására vonatkozóan. Egy irányba mutatnak a kutatási eredmények annak tekintetében, hogy az intercepció csökkentése, az állományi csapadék növelése a talajnedvességet pozitív irányban befolyásolja, ez pedig vagy a vízhozamok növekedésében, vagy a faállományok, illetve az erdők alsóbb szintjeinek a transzspirációjában megnyilvánul, csökkentve a vízdeficit időszakok hosszát. A talaj víztároló kapacitásának jelentősége is kiemelendő ebben az összefüggésben, a kráter homokos-vályogos homok textúrájú talajaiban ezek szerves-anyag tartalma lehet meghatározó. A felszín alatti hozzászivárgás és az evapotranszspiráció együttes növelésének kérdésében vélhetőleg ellentmondás van, de ez a kérdés további kutatásokat feltételez.

Kovács és munkatársai (Kovács et al., 2017) az Őrség Nemzeti Parkban kocsányos és kocsánytalan tölgy, bükk és erdeifenyő elegyes állományaiban végzett mikroklíma vizsgálatok alapján arra a következtetésre jutottak, hogy az állományok mikroklímájára döntő hatással van a második koronaszint, illetve a cserjeszint, valamint a fiatalabb fák alkotta alsó állományszintek. Ezeknek a szinteknek a növekvő aránya a páratartalom emelkedéséhez vezetett az állományban. Eredményeik alapján az alsó szintek strukturális elemei (alsó koronaszint, cserjeszint, mellmagassági átmérők heterogenitása) az állományklíma varianciáját nagyobb arányban befolyásolták, mint a felső koronaszint fajokösszetétele, a jól fejlett cserjeszint és alsó koronaszint a stabil állományklímának a fő tényezői. A Szent Anna-tó kráterében azonosított vegyeskorú bükkösök magas koronarészaránya, a fiatal fák jelenléte, a koronakezdet-magasság átlagának alacsony értéke, az újulati szint jelenléte a páratartalom magasabb értékeihez járulhat hozzá ezekben az állományokban. Figyelembe véve azt, hogy a középkorú bükkös mintaterületekben a koronarészarány és a koronakezdet-magasság tekintetében nem mutatható ki statisztikai eltérés a vegyeskorú bükkössel történő összehasonlításban, valószínűsíthető, hogy ez az állománykategória az állományklíma szempontjából hasonló lehet a vegyeskorú bükköshöz. Az idős bükkösben a szignifikánsan magasabb koronakezdet-magasság miatt a páratartalom változásai vélhetően erősebbek, az átlaga pedig kisebb értékű, mint a vegyeskorú bükkösben, ami hatással lehet a talajnedvesség eltérő alakulására is.

A különböző állományszerkezetek szerepét a szél hatásaival kapcsolatosan is értékelni kell. A szél a kráterben a tó párolgását befolyásoló tényező, de ezen kívül szerepe van a biomassza túba

hordásában is. A szélesebbesség csökkentése a párolgás és a feltöltődés szempontjából is fontos. A szél sebessége az állomány alatt 10%-ra csökken, a kilépő oldalon 30%-ra nő, az eredeti sebességét 30 m magasságnak megfelelő távolságra éri el (Vig, 1995). A kráterben ez a hatás jelentős légáramláscsökkenést idézhet elő, fékezve a tó fölötti paradús levegő kicserélését, ezáltal csökkentve a párolgást. A gyéritések hatására az állományban a szélesebbesség növekedését mutatták ki elegyes fenyőállományokban (Bigelow és North, 2012). A kráter sajátos alakja vélhetően jelentősen befolyásolja a szélviszonyokat, de a középkorú bükkös és a vegyeskorú bükkös állománykategória esetében a magas koronarészarány, az alacsony koronakezdet-magasság, illetve az újulati szint jelenléte a szélesebbességet hatékonyabban csökkentheti, ezáltal a szélviszonyok eltérően alakulhatnak, mint a nagyobb koronakezdet-magassággal jellemezhető idős bükkös nyitott törzsterében.

Mezővédő erdősávok esetében Frank és Takács (Frank és Takács, 2012) szerint ezekben a szerkezetüktől függően a szél ereje belátható távolságon belül felőrlődik, a szél csökkentésének szempontjából az erdősáv szél felőli és szélvédett oldali hézagfelületének van jelentős szerepe. A két hézagfelület arányaként definiált porozitás határozza meg, hogy az erdősáv a szélesebbesség csökkenését vagy növekedését fogja eredményezni. Ha a kilépő oldal hézagfelülete nagyobb, nyitottabb, ez a szélesebbesség csökkentését, ha a belépő oldal a nyitottabb, a kilépő hézagfelülete pedig kisebb akkor ez a csatornahatás révén a szélesebbesség akár többszörösére történő erősödését is kiválthatja. Az előbbieket ismeretében értékelve a tópart erdőszerkezetét képező lucos sáv zárt erdőszegélyét, amely fölött a kráter jelentős részén egykorú, középkorú lucos állományok helyezkednek el, nagyobb hézagfelületű szerkezettel, valószínűsíthető, hogy ez a zárt, kisebb hézagfelülettel jellemezhető erdőszegély a szél erősödését váltja ki a tó fölött, növelve a párolgást.

Az egyes faállományok a Szent Anna-tóba a szél általi biomasszabehordás tekintetében is eltérően viselkedhetnek. A lombhullás a szerves anyag és egyes tápelemek térbeli újra-rendeződésének a folyamatát is jelenti, lombhullató állományokban a koronaszint a lombhullás folyamán egyre nyitottabbá válik és ezáltal a szél hatásának fokozottabban ki van téve (Staelens et al., 2003). Virginiai keményfás állományokban végzett vizsgálatok szerint a meredek lejtőkön a lehullott avarnak a szél akár 40%-át is a lejtő aljának irányába mozgathatja (Orndorff és Lang, 1981), ezáltal ez egy jelentős szervesanyag-eloszlást meghatározó folyamat. A koronaszint alatti növényzet jelentős szereppel bír az avar újra-rendeződését illetően, mert nagy mennyiségű avar képes feltartóztatni, kis vízgyűjtők esetében a szerves-anyag mérlegek tanulmányozása során ezt figyelembe kell venni (Lee et al., 1999). A Szent Anna-tó kráterében található

állományszerkezetek szempontjából az egykorú, cserjeszint nélküli állományok ki vannak téve az avar lejtő irányába történő vándorlásának, főleg a meredekebb lejtésű kráterfalak esetében. Ez jelenség főleg a szél által könnyebben szállított, lombhullató fajok avarjának esetében merül fel, jelentősége a tó feltöltődése szempontjából fontos lehet. A vegyeskorú bükkös fejlett koronaszintje, kisebb koronakezdet-magassága és az itt fellelhető újulati szint az avarvándorlást jobban fékezheti. A lejtő aljába vándorló avarnak a tóba jutását a zárt, kisebb hézagfelületű erdőszegély által megnövelt szélsebesség is elősegítheti. Az avarvándorlási folyamatok mértékének feltárása érdekében a kráterben ilyen irányú vizsgálatok elvégzése is szükséges.

A természetvédelmi célok közt a természetesség megtartása és fokozása is prioritást kell élvezzen a Szent Anna-tó kráterének faállományainak esetében, az erdőgazdálkodási javaslatok kialakítása során ilyen szempontból is értékelni kell az egyes állományokat. A természetes erdőkép a termőhelynek megfelelő, őshonos fajkészletből és az őserdőmodellből (kis és nagy erdőciklus) levezethető struktúrákból áll és a természetes erdő a környezeti feltételek változására aránylag gyorsan reagál, ennek következtében viszonylag stabil, és az erdőfejlődési fázisok sokfélesége miatt a fluktuáló környezeti feltételek ellenére magas regenerációs potenciállal rendelkezik (Bartha, 2012b). A terület esetében a fafajkészlet tekintetében a faállományok természetessége jó, az itt található fafajok a termőhelynek megfelelő őshonos fajok. A szerkezet tekintetében ez a helyzet már árnyaltabb, az egykorú állományok ilyen szempontból kisebb értékűek, a vegyeskorú és az elegyes állományok természetessége e tekintetben nagyobb.

5.3. Erdőgazdálkodási javaslatok

A fentiekben ismertetett elemzés figyelembevételével a következő erdőgazdálkodási javaslatokat fogalmazom meg a Szent Anna-tó belső kráterlejtőin található faállományok kezelésével kapcsolatosan:

- 1. A záródás (horizontális) csökkentése és egy alacsonyabb szinten tartása (70-80%):** a korona-intercepció csökkentése által a vízgyűjtőben hasznosítható vízmennyiség növelése irányába lehet hatni, attól függetlenül, hogy a felszín alatti beszivárgás, illetve az állományok evapotranszpirációja által tud hasznosulni ez a vízmennyiség. A megnövekedett felszín alatti hozzászivárgás és/vagy a faállományokban a vízhiányos időszakok hosszának csökkentése révén, a száraz periódusokban a faállományok evapotranszpiráció általi hozzájárulásával a kráter relatív páratartalmához a Szent-Anna-tó vízmérlegében a növekedés irányába lehet hatni. A záródás csökkentésének tekintetében ennek mértéke az egyes erdőgazdálkodási beavatkozásokra (nevelővágások, felújítóvágások stb.) jellemző nagyságrendűként értendő, nagyterületű záródásbontás csak természetes bolygatás hatásainak a

felszámolása érdekében történhet. A teljes záródás nem kívánatos, ennek értelmében a teljes védelem, az erdőgazdálkodás beszüntetése nem javasolható a tó vízmérlegének szempontjából.

2. **A tavat szegélyező lucos sáv megtartása:** a kráterben ez a lucos erdőszegély a fordított zonalitás következtében alakult ki a tó közvetlen közelében. A Szent Anna-tó szempontjából a védelmi szerepe fontos, a tó produktivitását növelő bükk-biomassza behullását korlátozza, állandó lombos állapotával gátat képez a tó és a lombhullató állományok között, ez a szerep főleg az őszi lombhullás ideje alatt jelentős. A lucos sáv a tóparton árnyékolásával is biztosítja a magasabb relatív páratartalmat, de fenntartását a Szent Anna-tó vízszintjéhez képest csak olyan magasságban javaslom, ahol már a párologtatásához felhasznált vizet nem a tó táplálja, gyökérzete a tó által nedvesített talajszint fölött helyezkedik el.

A zárt lucos szegélynek a tó felőli, kis kilépő hízagfelülete a szélsőséget megnövelheti közvetlenül a talaj fölött (a koronák alatt), ezáltal az avarbehordás, illetve a tó párologtatásának tekintetében negatív hatást fejthet ki, a Szent Anna tónál a lucos szegély szélre gyakorolt hatásának további kutatása szükséges.

3. **Az idős, egykorú, elegyetlen bükkös állományok átalakítása vegyeskorú, elegyes állományokká:** az idős bükkösök esetében a szabad víz megjelenésének gyakorisága szignifikánsan kisebb, mint a vegyeskorú bükk állományban. A kevesebb felszín alatti beszivárgást biztosító idős bükkösökben ugyanakkor ez a vízmennyiség, ha nem a korona-intercepció következtében fellépő veszteséget képez, akkor az állományban hasznosul, az avar párologtatása vagy a növényzet evapotranszpirációja által, de a kráterlejtő felső harmadában elhelyezkedő idős egykorú bükkös evapotranszpirációja révén kifejtett hatása, a Szent Anna-tóhoz viszonyított távolabbi elhelyezkedése miatt, vélhetőleg kevésbé releváns a tó szempontjából. Az állomány színteztettségének hiányában és a nagy koronakezdet-magasság következtében az idős bükkös szélcsoökkentő hatása is gyengébb, a törzstér klímája vélhetőleg szárazabb és melegebb, mint a vegyeskorú, vertikális felépítésében összetettebb bükkösök esetében. Az alsó fásszárú szintek (újulatok, cserjeszint, második koronaszint) nélküli egykorú idős bükkösök az avar lejtő irányába történő vándorlása szempontjából is kevésbé javasoltak. A vegyeskorú szerkezet irányába történő átalakítás megkezdésének legmegfelelőbb módja a konzerváló vágások szálalóvágás jelleggel történő alkalmazása.

4. **A vegyeskorú bükkösök fenntartása, területarányuk növelése:** a szabad víz megjelenések nagyobb gyakorisága ezeknek az állományoknak egy kívánatos tulajdonsága a tó szempontjából. Az alsó állományszinteknek a jelenléte, a koronakezdet-magasság alacsony és a koronarészarány magas értékei magasabb páratartalmat, kiegyensúlyozottabb mikroklímát,

erősebb szélesökentő hatást eredményezhetnek. Az intercepció a bükk jelenléte miatt a téli időszakban kisebb, mint az elegyetlen lucosok esetében, az avarvándorlást a helyenként sűrű újulatok jelenléte következtében jobban fékezik. Természetesség szempontjából ezek az állományok a kráterben nagyobb értéket képviselnek és nagyobb stabilitással is rendelkeznek.

5. **A fiatal és középkorú bükkösök, lucosok és ezek elegyeinek vágásos erdőgazdálkodás szerint történő kezelése a vágásérettségi korig:** a fiatal és középkorú egykorú állományok vegyeskorú szerkezetűvé történő átalakításának megkezdését magas területarányuk és a kráterben betöltött hidrológiai szerepükkel kapcsolatos ismeretek hiányossága miatt egyelőre nem javasolnám, a talajban megjelenő szabad víz szempontjából jól viselkednek. Ezekben az állományokban a vágásos üzemmód szerinti gazdálkodást előíró üzemtervben foglalt beavatkozások végrehajtása javasolt, az 1. pontban megfogalmazott záródáscsökkentéssel. Átalakításuk a magzókor elérése előtt egyébként is jelentős akadályba ütközik, ugyanakkor ezeknek az állományszerkezeteknek a szerepét még tisztázni kell.
6. **A tópartot érintő faanyagmozgatás elkerülése a közelítőhálózat megfelelő kialakításával:** a közelítőhálózat tervezése során a kráterperem gerincútjának, illetve a burkolt műút irányába történő faanyagközelítési hálózat bővítése elfogadható, a tóparton található földút csak az ennek közvetlen közelében található faanyag közelítésére felhasználható, ez újabb közelítőnyomok kiindulási pontjaként nem szolgálhat. A közelítőutak hosszanti dőlésszögét az erózió elkerülése érdekében alacsony értéken kell tervezni.
7. **Erdészeti és vízügyi monitoring, kutatások kiterjesztése a kráter faállományaiban:** a vízgyűjtő működésének megismerése a legfontosabb cél, az egyes erdészeti kezelések, beavatkozások hatásának a kutatása, értékelése az erdőgazdálkodással párhuzamosan kell történnjen, a tó és a kráter állományai közti kölcsönhatások rendszerének minél alaposabb feltárása jelentheti a megoldás kulcsát a tó hosszú távú fenntartásához. A rendszer megismerése teszi csak lehetővé a megfelelő megoldások megtervezését, alkalmazását.

5.4. Gazdálkodási javaslatok az aktuális üzemterv érvényességi időszakára

1. A fiatalos, sűrűség és vékonyrudas életfázisú állományok esetében a vágásos üzemmód jellegzetes erdőnevelési eljárásait kell alkalmazni (fiatalos ápolás, ápolóvágás, tisztítóvágás).
2. A középkorú lucos és bükkös állományok esetében az üzemterv érvényességi ideje alatt az előírt gyérítéseket el kell végezni, a beavatkozások során az állományok teljes záródását 80%-ra kell csökkenteni; A gyérítések során a koronaszint felső részébe történő

beavatkozást tartom fontosnak, ezeket erdőművelési szempontból felső szinti szelektív gyériként lehet meghatározni. A beavatkozás intenzitását az állomány állapotához igazítva a záródás csökkentését egy vagy több beavatkozással kell elvégezni.

3. A vegyeskorú bükk állományokban az első fázisban csak az erdő szerkezetét és állapotát hosszabb időn keresztül változatlanul megőrző készletgondozó fahasználatot javaslok, tekintettel arra, hogy ezek az állományszerkezetek a jelenleg hatályos üzemterv előírásai szerint, a román erdőgazdálkodási szakirodalomban értelmezett konzerváló vágásokkal kezelhető erdőrészekben találhatóak, a beavatkozások készletgondozó jelleggel elvégezhetőek, ezek semmilyen jogi akadályba nem ütköznek.
4. Az idős egykorú bükkös állományok esetében, amelyekben a konzerváló vágások keretében csoportos (lékes) felújítógátás jelleggel történtek beavatkozások, a lékek további bontásának folytatását nem javaslom, a beavatkozás jellegét inkább a szálalógátások irányába volna szükséges folytatni, a konzerváló vágás nagyfokú szakmai szabadságot biztosító jellege miatt a hatályos üzemtervi időszakra vonatkozóan ez az irányváltás semmilyen jogi akadályt nem jelent.

6. ÖSSZEFOGLALÁS

A Szent Anna-tó kiemelkedő természeti értéket képvisel, jelentős turisztikai nyomásnak kitett terület, ugyanakkor egy változásban levő, érzékeny ökoszisztéma is. Az elmúlt közel másfél évszázad során számos írásos említés, tájleírás, kutatás tárgyát képezte. Ezek a kutatások a tó batimetriai paramétereinek, a vízminőségnek a romlását mutatták ki, a legfontosabb dokumentált folyamatok a feltöltődés, az eutrofizáció, a vízszint-csökkenés és ennek következtében a tározott vízmennyiség jelentős csökkenése. Számos kérdés merül fel a tó vízszintjének alakulásával, a feltöltődési folyamat erősségével és ennek lassításával, a vízminőséggel és a tóban zajló eutrofizációs folyamatokkal kapcsolatban.

A fő témakört, amelyben ok-okozati kapcsolatokat vizsgáltam, a kráterben található faállományok és a tó vízmerlege közötti összefüggések képezték. A vizsgálatok eredményeként megismert folyamatok, az egyes rendszer-elemek feltárt szerepei alapján próbáltam néhány javaslatot megfogalmazni, amellyel, meglátásom szerint, megfelelőbb irányba lehetne befolyásolni a tó sorsának alakulását és valamilyen mértékben lassítani lehet a kedvezőtlen folyamatokat.

Természetesen a tó és a kráterben található faállományok között fennálló, rendkívül összetett kapcsolatrendszer teljes vizsgálatára nem volt lehetőségem, az általam lényegesebbnek ítélt, a rendelkezésemre álló eszközök segítségével és a ráfordítható idő által meghatározott keretben megvalósítható vizsgálatokat próbáltam elvégezni.

A vizsgálatok legfontosabb eredményeit a célkitűzések során meghatározott kérdésekre adott válaszok formájában mutatom be:

- ***Melyek a Szent Anna-kráter legjellemzőbb állományainak főbb szerkezeti jellemzői?***

Azonosítottam a legjellemzőbb állományszerkezeteket a kráterben, amelyek a középkorú lucosok, középkorú bükkösök, idős bükkösök és vegyeskorú bükkösök. Ezekben az állományokban körös mintavétel segítségével mértem fel a legfontosabb állományszerkezeti jellemzőket.

- ***Vannak-e olyan eltérések az állományok közt, amelyek az állományklíma eltérő alakulását válthatják ki?***

A kortól kevésbé függő állományszerkezeti jellemzők, a koronarészarány és a koronakezdetmagasság esetében végeztem összehasonlító vizsgálatokat a különböző faállománykategóriák (középkorú bükkös, idős bükkös, vegyeskorú bükkös, középkorú lucos) esetében, a szabad víz megjelenésének vizsgálati helyszíneit képező mintaterületek esetében, a talajnedvesség alakulásával kapcsolatos esetleges összefüggések feltárása érdekében.

A koronarészarányok tekintetében végzett összehasonlítások eredményei alapján a középkorú lucosok alacsonyabb koronarészarány-értékkel jellemezhetők, a középkorú bükkösök és a vegyeskorú bükkösök koronarészarányai szignifikánsan magasabbak minden mintaterület esetében. Megállapítást nyert ugyanakkor, hogy a koronarészarányok tekintetében a középkorú bükkös és a vegyeskorú bükkös állománykategóriák esetében nem mutatható ki szignifikáns eltérés egyetlen mintaterület esetében sem.

A koronakezdet-magasság a törzstér magasságáról szolgáltat információkat. A vizsgált állománykategóriákban az idős bükkös koronakezdet-magassága szignifikánsan nagyobb, mint a középkorú bükkös és a vegyeskorú bükkös esetében, ez utóbbi két kategória közt azonban nincs szignifikáns eltérés. A középkorú lucosok esetében koronakezdet-magassága a középkorú bükkös mintaterületekénél szignifikánsan magasabb. A koronakezdet-magasság értékek szignifikáns eltérései főleg az azonos fafajú, hasonló biológiai felsőmagassággal jellemezhető idős bükkös és vegyeskorú bükkös állománykategóriák összehasonlításában fejeznek ki egyértelmű állományszerkezeti különbséget. A középkorú lucosok törzstere nyitottabb, mint a középkorú bükkösök esetében, az idős bükkös törzstere pedig a középkorú bükkös és vegyeskorú bükkös törzsterénél is áttörtebb.

- *A Szent Anna tó feltöltődése szempontjából az erdők felelősek-e azoknak a felszíni vízfolyásoknak a kialakulásáért, amelyek a hordalékot a tóba szállítják?*

A kérdés megválaszolására idős bükkös és középkorú lucos állományok, valamint felújítógátások során idős bükkösben kialakított lékekben vizsgáltam a víz talajinfiltrációjának sebességét (mm/h). A kettős gyűrűs infiltróméterek segítségével végzett méréseket az infiltráció sebességének állandósulásáig végeztem, az állandósult infiltrációs ráta különböző állományok alatt mért értékek átlagai különbözőségének értékeléséhez egyszempontos varianciaanalízis került alkalmazásra. Statisztikailag szignifikáns különbség volt kimutatható a középkorú lucosok és a bükkösben kialakított lécek állandósult infiltrációs rátái között. A középkorú lucosok infiltrációs rátájának 727 mm/h-t és a legalacsonyabb állandósult infiltrációs rátával jellemezhető, bükkösben képzett lécek 350 mm/h-t meghaladó átlagértékei is nagyon gyors beszivárgásnak minősülnek. Az állandósult infiltrációs ráták értékei alapján elmondható, hogy felszíni vízfolyások kialakulásának a valószínűsége nagyon alacsony ezek alatt az állományok alatt, csak olyan csapadékesemények során, vagy hóolvadáskor valószínűsíthető, amikor a talaj felső rétege teljesen átfagyott és a víz infiltrációja nem lehetséges, ebben az esetben azonban a talaj eróziója is akadályozott.

- ***A kráterben található többi felszínborítási kategóriával történő összehasonlításban hogyan értékelhető az erdők erózióvédelmi szerepe?***

Infiltrációméréseket a kráterben megtalálható gyepeken és a földutakon is végeztem. Az eredmények statisztikailag szignifikáns különbségeket igazoltak az erdő és a többi földhasználati kategória állandósult infiltrációs rátái közt. Az erdők esetében mért állandósult infiltrációs ráták átlagai sokkal magasabbak, mint a gyepek és a földutak állandósult beszivárgási sebességei. Az erdők hatékony erózióvédelmi szerepével ellentétben, a Szent Anna-tó kráterében a beszivárgási sebességek alacsonyabbak a gyepeken (átlagosan 171,9 mm/h) és a földutakon (átlagosan 31,1 mm/h), itt a felszíni folyások kialakulásának valószínűsége intenzív csapadékesemények során sokkal magasabb. Különösen jelentős a földutak szerepe, az ezeken a területeken kialakuló vízfolyások nagy mennyiségű hordalékot juttatnak a tóba.

- ***Az intenzív csapadékesemények alkalmával miért nem tud a csapadék a talajba beszivárogni, miért alakulnak ki a felszíni vízfolyások?***

Az infiltráció sebességét befolyásoló talajtulajdonságok vizsgálatával próbáltam választ keresni a felszíni vízfolyások megjelenésére. Az egyes talajtulajdonságok meghatározott értékei és az állandósult infiltrációs ráta értékei közt kerestem az összefüggéseket. A korrelációanalízisek eredményei a legjelentősebb, erős negatív korrelációt az állandósult infiltrációs ráta és a talaj tömörsége között mutatták ($r(49) = -0,6184$, $p < 0,001$). Az erdők és a többi földhasználati kategória talajtömörsége közt szignifikáns különbségeket tártam fel. Bizonyítást nyert, hogy a talaj tömörsége az oka a felszíni vízfolyások kialakulásának, a gyepek és földutak esetében a Szent Anna-tónál a talajtömörödés a turizmus következtében megjelenő intenzív taposás eredménye.

- ***Melyek a Szent Anna-tó vízmérlegének a legfontosabb komponensei?***

A Szent Anna-tó vízgyűjtőjét képező kráterben található erdők szerepének a megértéséhez a tó vízháztartásának a megismerése szükséges. A kutatás folyamán a tó vízmérleg-komponenseinek a vizsgálatával is foglalkoztam. Ennek céljából a tóhoz meteorológiai mérőállomást, a tó vízszintváltozásait, a vízfelszín hőmérsékletét rögzítő szenzorokat telepítettem. 412 nap csapadék, párolgás és vízszintváltozás adatai alapján statisztikai elemzést végeztem a víztározás változásainak a csapadéktól és a párolgástól való függésének a becslésére a többváltozós lineáris regresszió módszerével. A vizsgálat eredményei szerint a vízszint-változások varianciáját 96,9%-ban magyarázzák a vízmérleg csapadék és párolgás komponensei. Prediktív szempontból a modell szignifikáns. A mérések alapján nem bizonyítható nagyobb mértékű táplálás vagy

elfolyás létezése, ami a felszíni és felszín alatti hozzáfolyások, valamint a mélységi elszivárgás kumulatív hatásaként értelmezhető.

- ***A Szent Anna-tó kráterének belső, a tó vízgyűjtő területét képező lejtőinek talajaiban a talajnedvesség meghaladja-e a szabadföldi vízkapacitás értékét, megjelenik-e a szabad víz gravitációs formája?***

A felszín alatti hozzáfolyás létezésének, lehetőségének a kérdése szempontjából a kráterben található különböző faállomány-szerkezetekben vizsgáltam a szabadföldi vízkapacitás értékét meghaladó talajnedvesség megjelenését, mint tavat tápláló vízmérleg komponens, a felszín alatti hozzáfolyás feltételét.

A vizsgálat során idős bükkös, középkorú bükkös, középkorú lucos, vegyeskorú bükkösben, valamint idős egykorú bükkösben képzett lékekben vizsgáltam a szabad víz megjelenését a talajban. A vizsgálatához 50 centiméteres mélységben telepítettem adatrögzítővel ellátott talajnedvesség-mérő szenzorokat. A több, mint egy éves mérési időszak alatt a szenzorok mindegyik állományszerkezet esetében igazolták a szabad víz megjelenését csapadékos időszakok, illetve hóolvadás alkalmával. Az eredmények alapján a szabad víz megjelenik a kráter homok-vályogos homok textúrájú talajában, ezáltal a felszín alatti hozzászivárgás lehetőségét biztosítja a Szent Anna-tó irányába.

- ***A gravitációs víz megjelenése, ennek gyakorisága azonos-e a különböző fafajösszetételű és szerkezetű állományok alatt?***

A függetlenségvizsgálattal végzett összehasonlítás eredménye alapján a szabad víz megjelenésének gyakoriságai legalább egy esetben nem voltak függetlenek az egyes kategóriáktól. A páronkénti értékelés eredményei szignifikánsak az idős bükkösnek a vegyeskorú bükkössel történő összehasonlítása, valamint az idős bükkösnek középkorú bükkössel végzett összehasonlítása esetén. Az eredmények alapján az egyes állományszerkezetek esetében eltérő gyakorisággal jelenik meg a szabad víz a talajban, az idős bükkös alatt kisebb gyakorisággal jelenik meg.

A kutatási eredmények alapján javaslatokat fogalmaztam meg az erdőgazdálkodásra a Szent Anna-tó kráterében.

Az eddig elvégzett kutatások alapján betekintést kaphatunk a kráter faállományai és a Szent Anna-tó kapcsolatrendszerébe, de nagyobb léptékű kutatótevékenységre van szükség az összefüggések és folyamatok még pontosabb megismerésének érdekében.

7. ÚJ TUDOMÁNYOS EREDMÉNYEK, TÉZISEK

1: A Szent Anna-tó kráterének közepes termőképességű, egykorú és vegyeskorú bükk állományaiban az eltérő korszerkezet nem feltételez a koronarészarányban is megjelenő szignifikáns különbségeket. A középkorú bükkösben és a vegyeskorú bükkösben a koronarészarányok nem különböznek egymástól, a Kruskal-Wallis teszt eredményei alapján nem utasítható el a mediánok azonossága a mintaterületek páronkénti összehasonlításai során. Az idős bükkösnek a középkorú és vegyeskorú bükkössel végzett összehasonlításban egyetlen mintaterület esetében mutatható ki szignifikáns eltérés. A vegyeskorú szerkezet nem jellemezhető egyértelműen magasabb koronarészaránnyal az egykorú állományszerkezethez képest a Szent Anna-tó kráterének állományaiban.

2: A koronakezdet-magasság a Szent Anna-tó közepes termőképességű bükköseiben függ a korszerkezettől. Szignifikáns különbség van a koronakezdet-magasság tekintetében a vizsgált idős bükkös és a vegyeskorú bükkös mintaterületek esetében, annak ellenére, hogy mindkét állomány hasonló biológiai felsőmagassággal rendelkezik. Az idős egykorú bükkös állomány koronakezdet-magassága szignifikánsan nagyobb.

3: A Szent Anna-tó kráterének belső lejtőin a faállományok nem tehetők felelőssé a tó talajbemosódás következtében történő feltöltődési folyamatáért. Az erdők homok, vályogos-homok textúrájú disztrikus andoszol talajtípusa esetében a víz állandósult infiltrációsebességének átlagai a nagyon magas (> 145 mm/h) kategóriába sorolhatók, a felszíni vízfolyások kialakulásának a lehetősége minimális még a legkedvezőtlenebb kategóriát képviselő, legalacsonyabb infiltrációsebességgel jellemezhető bükkös állományban létrehozott lékekben is. A kráterlejtőkön az erdők ezáltal megfelelő erózióvédelmet biztosítanak (Szmolka és Frank, 2022a).

4: Jelentős különbség van a középkorú lucosok és az idős bükkösben létrehozott lécek talajinfiltrációs rátái közt. A Szent Anna-tó kráterének belső lejtőin található egyes állományszerkezetek állandósult infiltrációs rátáinak egyszempontos varianciaanalízissel történő összehasonlítása alapján szignifikáns különbség van a csoportok közt 5%-os szignifikanciaszinten. A lékekben az állandósult infiltrációs ráta értéke szignifikánsan kisebb, mint a középkorú lucosok esetében, annak ellenére, hogy az idős bükkös (amelyben a lécek kialakításra kerültek) és a középkorú lucos infiltrációs rátái közt nincs statisztikailag igazolható különbség (Szmolka és Frank, 2022a). A lécek kialakítása az állandósult infiltrációs ráta csökkenését váltja ki.

5: Az egyes felszínborítási kategóriák tekintetében szignifikáns eltérés van a talaj állandósult infiltrációs rátáit tekintve a Szent Anna-tó kráterében. Az erdők esetében az állandósult infiltrációs ráta szignifikánsan magasabb, mint a gyepek esetében és mint a földutak esetében. A tó feltöltődéséhez a gyepek és földutak az intenzív csapadékesemények alkalmával kialakuló vízfolyások általi hordalékbehordással járulnak hozzá (Szmolka és Frank, 2022a). Ez az eredmény megerősíti az erdők védelmi szerepének a tényét a kráterben.

6: Az állandósult infiltrációs ráta nagyon alacsony értékeit a földutak és a gyepek esetében a talaj tömörsége magyarázza. Erős negatív korreláció van az állandósult infiltrációs ráta és a talaj tömörsége között ($r(49) = -0,6184$, $p < 0,001$). A talaj tömörödése az emberi taposás következménye, ami a földutakon, ösvényeken egyértelmű, de a tóparti gyepek is erősen ki vannak téve ennek a hatásnak a magas turisztikai látogatottság következtében (Szmolka és Frank, 2022a). A Szent Anna-tó hosszútávú fenntartása érdekében a gyepek és földutak talajtömörödésének a csökkentése szükséges.

7: A csapadék és a párolgás nagymértékben magyarázza a Szent Anna-tó vízszintjének a változását a többváltozós lineáris regresszió módszerével számított egyenlet szerint ($\Delta S = 1,04259CS - 1,02487P + 0,04662$). A regresszió statisztikailag szignifikáns ($R^2 = 0,9688$, $F(2, 409) = 6586$, $p < 0,0000$) eredményű 5%-os szignifikanciaszinten. A csapadék szignifikánsan magyarázza a vízszint változását ($\beta = 1,04259$, $P < 0,00001$), hasonlóképpen a párolgás is szignifikánsan magyarázza a vízszint változását ($\beta = -1,05487$, $p < 0,00001$). A vízszint változását 96,9%-ban igazolja a csapadék és a párolgás a Szent Anna-tó esetében, ez a két komponens a legfontosabb meghatározója a vízmérlegnek (Szmolka és Frank, 2022b).

8: A Szent Anna-tó belső kráterlejtőjét borító faállományok talajában a szabadföldi vízkapacitást meghaladó nedvességtartalom előfordul, a talajban megjelenő szabad víz ezáltal hozzájárulhat a Szent Anna-tó vízmérlegének felszín alatti hozzáfolyás komponenséhez. A szabad víz megjelenésének a gyakorisága legalább egy esetben nem független a faállomány-kategóriától, a függetlenségvizsgálat eredménye szignifikáns 5%-os szignifikanciaszinten. Az egykorú idős bükkös talajában a szabadföldi vízkapacitást meghaladó nedvességtartalom szignifikánsan kevesebb alkalommal jelentkezik, mint a középkorú és mint a vegyeskorú bükk állományban (Szmolka és Frank, 2022c). Az idős bükkösök a szabad víz megjelenésének tekintetében kedvezőtlenebb módon hatnak a Szent Anna-tó homok, vályogos-homok textúrájú talajainak nedvességviszonyainak alakulására, mint a középkorú és a vegyeskorú bükkösök.

Köszönetnyilvánítás

Köszönettel tartozom témavezetőmnek, Frank Norbertnek a kutatás során nyújtott tanácsokért és támogatásért.

Hálás vagyok Dósa Elek Leventének, a Pro Szent Anna Egyesület képviselőjének a sok információért, terepi segítségért, azért, hogy a terepi munka mindig gördülékenyen zajlott.

Köszönöm Szakács Mártonnak, a Lázárfalvi Szent Anna Közbirtokosság elnökének, hogy lehetővé tette, elősegítette a kutatást a területen.

Köszönöm a Pro Szent Anna Egyesület és a Lázárfalvi Közbirtokosság alkalmazottainak a terepen nyújtott segítséget.

Köszönöm a Csiki Magánerdészethez a hasznos adatokat, a beleegyezést, azt, hogy a munkák zökkenőmentesen működhetett a terepen.

Köszönöm Kerezsi Lászlónak, a Szent Anna-tó Természetvédelmi Terület visszavonult gondnokának, hogy engedélyezte, segítette a kutatást a területen.

Köszönöm Führer Ernőnek, az Erdészeti Tudományos Intézet tudományos tanácsadójának a hasznos adatokat és tanácsokat.

Köszönöm Máthé Istvánnak, a Sapientia Erdélyi Magyar Tudományegyetem tanárának, hogy munkával, adatokkal, eszközökkel, tanácsokkal segítette a kutatást.

Köszönöm Csiszér Leventének, a Sapientia Erdélyi Magyar Tudományegyetem tanárának a talajtani kérdésekben, mérésekben nyújtott segítséget.

Köszönöm Rákosi Kingának, a Sapientia Erdélyi Magyar Tudományegyetem tanárának a szerves széntartalom meghatározásában nyújtott segítséget.

Köszönöm Varga Leventének, a sepsibükszádi Strabag andezitbánya vezetőjének a talajtextúra meghatározásának vizsgálataikhoz nyújtott segítséget.

Köszönöm Szilágyi Ákosnak, Tóth Szabolcsnak, Téglás Szabolcsnak és Gábos Lászlónak a terepi munkában nyújtott segítségüket.

Köszönöm a feleségemnek Szmolka Editnek a munkában nyújtott segítséget, a támogatást, biztatást, gyerekeimnek, Eszternek, Ágnesnek és Emesének a sok türelmet és megértést.

Köszönöm édesapámnak, Szmolka Istvánnak, aki a legtöbbet segített a felszerelések elkészítésében, a terepi munkában, aki a legjobban támogatta, időt, energiát nem sajnálva, saját egészségét nem kímélve a kutatásaim megvalósulását, valamint édesanyámnak, Szmolka Mártának és húgomnak, Szmolka Zsuzsannának minden segítségét.

Hálával tartozom a Soproni Egyetem munkaközösségének, hogy lehetővé tette doktori tanulmányaimat.

Irodalomjegyzék

- Badea, L., Gâștescu, P., Velcea, V., Bogdan, O., Donisă, I., Dragomirescu, S. *et al.* (szerk.), (1983): *Geografia României - Geografia fizică*. [Románia földrajza - Fizikai földrajz.] Köt. I. București: Editura Academiei R.S.R.
- Bartha, D., (2012a): A természetes erdő megújulása – erdődinamika. In: *Természetvédelmi élőhelykezelés*. Budapest: Mezőgazda kiadó, 179–180.
- Bartha, D., (2012b): Az erdők természetvédelmi megítélésének szempontjai. In: *Természetvédelmi élőhelykezelés*. Budapest: Mezőgazda kiadó, 166–168.
- Beck, H. E., Zimmermann, N. E., McVicar, T. R., Vergopolan, N., Berg, A., Wood, E. F., (2018): Present and future Köppen-Geiger climate classification maps at 1-km resolution. *Scientific Data* (5:180214), 1–12. DOI:10.1038/sdata.2018.214
- Begy, R. C., Timár-Gábor, A., Somlai, J., Cosma, C., (2011): A sedimentation study of St. Ana Lake (Romania) applying the 210Pb and 137Cs Dating methods. *Geochronometria* 38(2), 93–100.
- Beldie, Al., Chiriță, C., (1954): *Plante indicatoare din pădurile noastre*. [Erdeink indikátornövényei.] București: Editura Agro-Silvică de Stat.
- Bens, O., Wahl, N. A., Fischer, H., Hüttl, R. F., (2007): Water infiltration and hydraulic conductivity in sandy cambisols: impacts of forest transformation on soil hydrological properties. *European Journal of Forest Research* 126, 101–109.
- Bereziuc, R., Oprea, V., Olteanu, N., (1987): *Rețele de drumuri forestiere*. [Erdei úthálózatok.] București: Editura Cereș.
- Bigelow, S. W., North, M. P., (2012): Microclimate effects of fuels-reduction and group-selection silviculture: Implications for fire behaviour in Sierran mixed-conifer forests. *Forest Ecology and Management* 264, 51–59.
- Boros, Á., 1943: A Kukojszás vagy Mohos-tó és a Szentanna-tó lápja. *Debreceni Szemle* 17(5), 113–115.
- Bréda, N., Granier, A., Aussenac, G., (1995): Effects on thinning on soil and tree water relations, transpiration and growth in an oak forest (*Quercus petraea* (Matt.) Liebl.). *Tree Physiology* (15), 295–306.
- Campo, A. D., Otsuki, K., Serengil, Y., Blanco, J. A., Yousefpour, R., Wei, X., (2022): A global synthesis on the effects of thinning on hydrological processes: Implications for forest management. *Forest Ecology and Management* (519), 1–15.
- Carpatclim, (2010): *Climate of the Carpathian Region*. Elérhető: www.carpatclim-eu.org
- Chen, L., Zhiyou, Y., Hongbo, S., Dexiang, W., Xingmin, M., (2014): Effects of Thinning intensities on Soil Infiltration and Water Storage Capacity in a Chinese Pine-Oak Mixed Forest. *The Scientific World Journal* Article ID 268157, 7 pages.
- Cheval, S., Birsan, M.-V., Dumitrescu, A., (2014): Climate variability in the Carpathian Mountains Region over 1961–2010. *Global and Planetary Change* 118, 85–96.
- Davenport, A. G., (1960): Rationale for determining design wind velocities. *Proceedings of the American Society of Civil Engineers - Journal of the Structural Division* 86(5), 39–68.
- Dincă, L., Lucaci, D., Iacoban, C., Ionescu, M., (2012): *Metode de analiza solului și soluției solului*. [Talaj és a talajoldat vizsgálati módszerei.] București: Editura silvică.
- Doniță, N., Chiriță, C., Stănescu, V., Almășan, H., Arion, C., Armășescu S. *et al.*, (1990): *Tipurii de ecosisteme forestiere din România*. [Romániai erdei ökoszisztéma-típusok.] București: Ministerul Apelor, Pădurilor și Mediului Înconjurător, Institutul de Cercetări și Amenajări Silvice.
- Doniță, N., Popescu, A., Paucă-Comănescu, M., Mihăilescu, S., Biriș, I.-A., (2005): *Habitatele din România*. [Románia élőhelyei.] București: Editura Tehnică silvică.

- FAO, (2015): *World reference base for soil resources 2014*. Rome: Food and Agriculture Organization of the United Nations.
- Florea, N., Munteanu, I., Rusu, C., Dumitru, M., Ianoş, Gh., Răducu, D. *et al.*, (2012): *Sistemul român de taxonomie a solurilor (SRTS)*. [A román talajosztályozási rendszer (SRTS).] Bucureşti: Institutul Naţional de Cercetare - Dezvoltare pentru Pedologie, Agrochimie şi Protecţia Mediului.
- Frank, N., Takács, T., (2012): Hó- és szélfogó erdősávok minősítése szélesebbécsökkentő hatásuk alapján. *Erdészettudományi közlemények* 2(1), 151–162.
- Führer, E., (1992): Intercepció meghatározása bükk, kocsánytalan tölgy és lucfenyő esetében. *Vízügyi közlemények* (3.), 281–294.
- Gâştescu, P., Driga, B., (1983): Lacurile. In: *Geografia României - Geografia fizică*. [A tavak. In: Románia földrajza - Fizikai földrajz.] Bucureşti: Editura Academiei R.S.R., I., 351–367.
- Gelei, J., (1909): A Szent-Anna tó. *Földrajzi közlemények* XXXVII(5), 177–200.
- Giurgiu, V., Decei, I., Drăghiciu, D., (2004): *Metode şi tabele dendrometrice*. [Dendrometriai módszerek és táblázatok.] Budapest: Editura Cereş.
- Giurgiu, V., Drăghiciu, D., (2004): *Modele matematico-auxologice şi tabele de producţie pentru arborete*. [Matematikai-auxológiai modellek és táblázatok faállományokra.] Bucureşti: Editura Cereş.
- Goeking, S Effects. A., Tarboton, D. G., (2020): Forests and Water Yield: A synthesis of Disturbance on Streamflow and Snowpack in Western Coniferous Forests. *Journal of Forestry*, 172–192. DOI:10.1093/jofore/fvz069
- Gombos, B., (2011): *Hidrológia - hidraulika*. Gödöllő: Szent István Egyetem.
- Hankó, V., (1901): Csíkmegye. In: *Az Osztrák-Magyar Monarchia írásban és képbén. Magyarország VII. - Délkelet Magyarország: Erdély és a szomszédos hegyvidékek*. Budapest: Magyar Királyi Államnyomda, XX.
- Harangi, S., Molnár, M., Vinkler, A. P., Kiss, B., Jull, A. J. T., Leonard, A. G., (2010): Radiocarbon dating of the last volcanic eruptions of Ciomadul Volcano Southeast Carpathians, Eastern-Central Europe. *Radiocarbon* 52(2–3), 1498–1507.
- Huang, J. (2018): A Simple Accurate Formula for Calculating Saturation Vapor Pressure of Water and Ice. *Journal of Applied Meteorology and Climatology* 57, 1265–1272. DOI:10.1175/JAMC-D-17-0334.1
- Jakab, S., Krézsek, J., (2008): *Talajtan és agrokémia*. Marosvásárhely: Editura University Press.
- Jánosi, Cs., Péter, É., (1995): A Csomád-Büdös hegycsoport felszíni vizei. In: *Csíki zöld füzetek*. Csíkszereda: Csíki természetjáró és természetvédő egyesület, 1, 41–55.
- Járó, Z., (1981): A hazai erdők vízfogyasztása. *Agrártudományi közlemények* 40, 353–356.
- Karátson, D., Telbisz, T., Harangi, S., Magyar, E., Dunkl, I., Kiss, B. *et al.*, (2013): Morphometrical and geochronological constraints on the youngest eruptive activity in East-Central Europe at the Ciomadul (Csomád) lava dome complex, East Carpathians. *Journal of Volcanology and Geothermal Research* 255, 43–56. DOI:10.1016/j.jvolgeores.2013.01.013
- Karátson, D., Veres, D., Lahitte, P., Dibacto, S., Kiss, B., Magyar, E. *et al.*, (2022): Evolution of the Ciomadul Volcanic Field-Lava Domes and Explosive Eruptions. In: *Ciomadul (Csomád), The Youngest Volcano in the Carpathians*. Springer Nature Switzerland AG, 39–63.
- Kis, B.-M., Palcsu, L., (2022): A Szent Anna-tó vizének stabilizotóp-összetétele. In: *A gyorsan változó Szent Anna-tó*. Kolozsvár: Erdélyi Múzeum-Egyesület, 51–52.
- Koloszár, J. (1990): *Erdőműveléstan I*. Sopron.

- Koloszár, J. (2009): *Védett erdők kezelése*. Sopron: Mezőgazda kiadó és a Nyugat-Magyarországi Egyetem Erdőmérnöki Kar közös kiadása.
- Kovács, B., Tinya, F., Ódor, P., (2017): Stand structural drivers of microclimate in mature temperate mixed forests. *Agricultural and Forest Meteorology* 234–235, 11–21. DOI: 10.1016/j.agrformet.2016.11.268.
- Kristó, A., (1995): A Csomád-Büdös hegycsoport földtani és geomorfológiai képe. In: *Csíki zöld füzetek*. Csíki természetjáró és természetvédő egyesület, 25–40.
- Kucsara, M., (1998): Az erdő csapadékviszonyainak vizsgálata. *Vízügyi közlemények* (3.), 456–474.
- Lagergren, F., Lankreijer, H., Kucera, J., Cienciala, E., Meelis, M., Lindroth, A., (2008): Thinning effects on pine-spruce forest transpiration in central Sweden. *Forest Ecology and Management* 255(7), 2312–2323. DOI:10.1016/j.foreco.2007.12.047
- Lee, D., Yoo, G., Oh, S., Shim, J. H., Kang, S., (1999): Significance of Aspect and Understorey Type to Leaf Litter Redistribution in a Temperate Hardwood Forest. *Korean Journal of Biological Sciences* 3, 143–147. DOI:10.1080/12265071.1999.9647477
- Madarász, B., (2005): Andosols: a vulkáni anyagon kifejlődött ásványi talajok. *Agrokémia és Talajtan* 54(3–4), 509–516.
- Mádlné Szőnyi, J., Czauner, B., Simon, S., Erőss, A., Zemle, F., Pulay, E. *et al.*, (2013): *Hydrogeológia*. Budapest: Eötvös Lóránd Tudományegyetem.
- Magyari, E., Buczkó, K., Jakab, G., Braun, M., Pál, Z., Karátson, D. *et al.*, (2009): Palaeolimnology of the last crater lake in the Eastern Carpathian Mountains: a multiproxy study of Holocene hydrological changes. *Hydrobiologia* 631, 29–63. DOI:10.1007/s10750-009-9801-1
- Magyari, E., Buczkó, K., Jakab, G., Braun, M., Szántó, Z., Molnár, M. *et al.*, (2006): Holocene palaeohydrology and environmental history in the South Harghita Mountains, Romania. *Földtani közlöny* 136(2), 249–284.
- Magyari, E. K., Veres, D., Wennrich, V., Wagner, B., Braun, M., Jakab, G. *et al.*, (2014): Vegetation and environmental responses to climate forcing during the Last Glacial Maximum and deglaciation in the East Carpathians: attenuated response to maximum cooling and increased biomass burning. *Quaternary Science Reviews* XXX, 1–21.
- Maidment, D. R., (1993): *Handbook of Hydrology*. McGraw-Hill, Inc.
- Majer, A., (1968): *Magyarország erdőtársulásai*. Budapest: Akadémiai Kiadó.
- Máthé, I., Vörös, L., (2022): A lebegő mikroszkópikus algák hatása a fizikai környezetre. In: *A gyorsan változó Szent Anna-tó*. Kolozsvár: Erdélyi Múzeum-Egyesület, 84–88.
- Máthé, I., Vörös, L., Felföldi, T., Zsigmond, A.-R., Szabó, A., Kis, B.-M. *et al.*, (2022): *A gyorsan változó Szent Anna-tó*. Kolozsvár: Erdélyi Múzeum-Egyesület.
- Máthé, I., Zsigmond, A.-R., (2022): A Szent Anna-tó vizének kémhatása (pH-ja). In: *A gyorsan változó Szent Anna-tó*. Kolozsvár: Erdélyi Múzeum-Egyesület, 44–47.
- Meyer, A. F., (1942): *Evaporation from Lakes and Reservoirs, a Study based on fifty years' weather bureau records*. Minnesota: Minnesota Resources Commission.
- Mihály, I., (2018): A Szent Anna-tó fenékrajzainak nyomában, *Székelyföldi Geológus Találkozó kivonatkötet*, 27–29.
- Montesi, J., Elder, K., Schmidt, R. A., Davis, R. E., (2004): Sublimation of Intercepted Snow within a Subalpine Forest Canopy at Two Elevations. *Journal of Hydrometeorology—Special Section* 5, 763–773.
- Neris, J., Jiménez, C., Fuentes, J., Morillas, G., Tejedor, M., (2012): Vegetation and land-use effects on soil properties and water infiltration of Andisols in Tenerife (Canary Islands, Spain). *Catena* 98, 55–62.
- Niculescu, N.-V., (2014): *Silvicultură II. Silvotehnică*. [Erdőműveléstan II. Erdőtechnika.] Braşov: Editura Aldus.

- Nyárádi, E. G., (1929): A vizek és a vízben bővelkedő talajok növényzetéről a Hargitában. In: *Emlékkönyv a Székely Nemzeti Múzeum Jubileumára*. Székely Nemzeti Múzeum, 557–615.
- Oancea, D., Velcea, V., Caloianu, N., Dragomirescu, S., Dragu, G., Mihai, E. *et al.*, (1987): *Geografia României - Carpații Românești și Depresiunea Transilvaniei*. [Románia földrajza - A Romániai Kárpátok és az Erdélyi-medence.] Köt. III. București: Editura Academiei R.S.R.
- Orbán, B., (1869): *A Székelyföld leírása*. Köt. III. Pest: Ráth Mór kiadása.
- Orndorff, K. A., Lang, G. E., (1981): Leaf litter redistribution in a West Virginia hardwood forest. *Journal of ecology* 69, 225–235.
- Pál, Z., (2000): A Szent Anna-tó: következtetések a tó mélységét és a feltöltődést illetően. *Collegium Geographicum* I., 65–74.
- Pál, Z., (2001): A Szent Anna-tó batimetriája. *Collegium Geographicum* II., 73–78.
- Păltineanu, Cr., Mihăilescu, I. Fl., Seceleanu, I., Dragotă, C., Vasenciuc, F., (2007): *Ariditatea, seceta, evapotranspirația și cerințele de apă ale culturilor agricole în România*. [Ariditás, aszály, evapotranszpiráció és a mezőgazdasági kultúrák vízigénye] Ovidius University Press.
- Pandi, G., (2008): Morphometry of Lake Sfanta Ana, Romania. *Lakes, reservoirs and ponds* 1-2, 72–79.
- Paul, C., Brandl, S., Friedrich S., Falk, W., Hartl, F., Knoke, T., (2019): Climate change and mixed forests: how do altered survival probabilities impact economically desirable species proportions of Norway spruce and European Beech? *Annals of Forest Science* 76(14), 1–15. DOI:10.1007/s13595-018-0793-8
- Pécskay, Z., Edelstein, O., Seghedi, I., Szakács, A., Kovacs, M., Crihan, M. *et al.*, (1995): K-Ar datings of Neogene-Quaternary calc-alkaline volcanic rocks in Romania. *Acta Vulcanologica* 7(2), 53–61.
- Pisota, I., Năstase, A., (1957): *Lacul Sf. Ana*. [A Szent Anna-tó.] Köt. IX. București: Editura de Stat pentru Imprimare și Publicații.
- Rascón-Ramos, A. E., Martínez-Salvador, M., Sosa-Pérez, G., Guerrero, F. V., Pinedo-Alvarez, A., Santellano-Estrada, E. *et al.*, (2021): Soil Moisture Dynamics in Response to Precipitation and Thinning in a Semy-Dry Forest in Northern Mexico. *Water* 13(105), DOI:10.3390/w13010105
- Schreiber, W. E., Unger, E., (2006): A poszterruptív felszínfejlődés néhány sajátos formája a Hargita vulkáni vonulatában. *Földtani közlöny* 136(1), 285–298.
- Staelens, J., Nachtergale, L., Luyssaert, S., Lust, N., (2003): A model of wind-influenced leaf litterfall in a mixed hardwood forest. *Canadian Journal of Forest Research* 33, 201–209.
- Standovár, T., (1996): Növénytársulások dinamikája. In: *Erdészeti ökológia*. Budapest: Mezőgazda kiadó, 72–92.
- Stefanovits, P., Filep, Gy., Füleki, Gy., (2010): *Talajtan*. Budapest: Mezőgazda kiadó.
- Stoenescu, S. M., Șchiopescu, A., Dincă, I., Popescu, E., Patrichi, S., Țepeș, E. *et al.* (szerk.), (1966): *Atlasul Climatologic al Republicii Socialiste România*. [A Román Szocialista Köztársaság klimatológiai atlasza.] Comitetul de Stat al Apelor, Institutul Meteorologic.
- Szmolka, P., Frank, N., (2022a): Analysis of infiltration rates of soils on the inner slopes of the Lake Sfânta Ana crater. *Carpathian Journal of Earth and Environmental Sciences* 17(1), 101–110. DOI:10.26471/cjees/2022/017/204
- Szmolka, P., Frank, N., (2022b): Estimation of the water budget components of the Sfânta Ana crater lake in the Eastern Carpathians. *Russian Meteorology and Hydrology* 47(9), 685–691. DOI:10.3103/S1068373922090060

- Szmolka, P., Frank, N., (2022c): Szabad víz megjelenése a talajban különböző faállományok alatt a Szent Anna-tó kráterének belső lejtőin. *Erdészettudományi Közlemények* 12(1-2), 43–55. DOI: 17164/EK.2022.03
- Szodfridt, I., (1996): Az erdő és a víz. In: *Erdészeti ökológia*. Budapest: Mezőgazda kiadó, 240–247.
- Târziu, D., (1997): *Pedologie și stațiuni forestiere*. [Talajtan és erdei termőhelyek.] București: Editura Cereș.
- Veperdi, G., (2008): *Faterméstan*. Sopron: Nyugat-Magyarországi Egyetem.
- Víg, P., (1995): *Éghajlattan*. Sopron: Nyugat-Magyarországi Egyetem.
- Vodă, A., Raclariu, I., (2017): Amenajamentul silvic al fondului forestier proprietate privată aparținând asociației composesorale Sfânta Ana și persoanelor fizice cu domiciliul în comuna Cozmeni, județul Harghita. [A Lázárfalvi Szent Anna közbirtokosság és a Csíkkozmási lakhelyű magánszemélyek magánerdőinek erdészeti üzemterve, Harghita megye.] Tehnosilv S.R.L.
- Vofkori, L., (2004): *Utazások Székelyföldön*. Csíkszereda: Pro-Print Könyvkiadó.
- Vörös, L., Máthé, I., (2022a): A Szent Anna-tó jelenlegi trofikus állapota. In: *A gyorsan változó Szent Anna-tó*. Kolozsvár: Erdélyi Múzeum-Egyesület, 89–90.
- Vörös, L., Máthé, I., (2022b): Növényi tápelemek és a fitoplankton kapcsolata a Szent Anna-tóban. In: *A gyorsan változó Szent Anna-tó*. Kolozsvár: Erdélyi Múzeum-Egyesület, 80–83.
- Weng, Y. T., Yi, L. T., Yao, L. L., Fei, S. T., (2018): Newly Calibrated Analytical Models for Soil Moisture Content and pH Value by Low-Cost YL-69 Hygrometer Sensor. *Measurement* 134, 166–178. DOI:10.1016/J.MEASUREMENT.2018.10.071
- Xu, L., Cao, G., Wang, Y., Hao, J., Wang, Y., Yu, P. *et al.*, (2020): Components of stand water balance of a larch plantation after thinning during the extremely wet and dry years in the Loess Plateau, China. *Global Ecology and Conservation* 24.
- Yuteng, M., Remke, L. V. D., Dushmantha, H. J., (2014): Soil moisture variability in a temperate deciduous forest: insights from electrical resistivity and throughfall data. *Environmental earth sciences* 72, 1367–1381. DOI:10.1007/s12665-014-3362-y
- Zhang, J., Lei, T., Qu, L., Chen, P., Gao, X., Chen, C. *et al.*, (2017): Method to measure soil matrix infiltration in forest soil. *Journal of Hydrology* 552, 241–248.

Internetes források

- URL 1: Google WMS műholdtérkép szolgáltatás: <https://mt0.google.com/vt/lyrs=s&hl=en&x={x}&y={y}&z={z}>; megtekintve: 2023. június 4.
- URL 2: *Legea nr. 5/2000 privind aprobarea Planului de amenajare a teritoriului național - Secțiunea a III-a - zone protejate*. [5/2000 törvény a Nemzeti Területrendezési Terv jóváhagyásáról - III. rész - védett területek]: <https://lege5.ro/>; megtekintve: 2023. május 28
- URL 3: *Legea 46/2008 privind Codul Silvic*. [46/2008 sz. Erdőtörvény]: <https://lege5.ro/App/Document/g42dknrxg4/codul-silvic-din-2008>; megtekintve: 2023. május 28.
- URL 4: *Ordinul Ministerului Mediului nr. 1408/2017 privind aprobarea Planului de management și a Regulamentului ROSCI0248 - Tinovul Mohoș - Lacul Sf. Ana*. [A Környezetvédelmi Minisztérium 1408/2017 rendelete a Mohos Tőzezláp – Szent Anna-tó ROSCI0248 Menedzsmenttervének és Szabályzatának jóváhagyásáról]: <https://lege5.ro/>; megtekintve: 2023. május 17.
- URL 5: *Ordinul Ministerului Mediului și Dezvoltării Durabile nr. 1964/2007 privind instituirea regimului de arie naturală protejată a siturilor de importanță comunitară, ca parte*

integrantă a rețelei ecologice europene Natura 2000 în România. [A Környezetvédelmi és Fenntartható Fejlődés Minisztériumának 1964/2007 rendelete a közösségi jelentőségű területek, mint az európai Natura 2000 ökológiai hálózat Romániai részeinek védett területté történő nyilvánításáról]: <https://lege5.ro/>; megtekintve 2023. május 17.

URL 6: *Ordonanța de urgență nr. 57/2007 privind regimul ariilor naturale protejate, conservarea habitatelor naturale, a florei și faunei sălbatice.* [57/2007 Sürgösségi Kormányrendelet a természetvédelmi területek jogrendjéről, a természetes élőhelyek megőrzéséről, a vadon élő flóráról és faunáról]: <https://lege5.ro/>; megtekintés dátuma 2023. május 17.

Táblázatok jegyzéke

1. táblázat. Elegyarány, hektáronkénti törzsszám, átlagos törzstávolság, folyónövedék, fatermési osztály a középkorú bükkös mintaterületeken.....	52
2. táblázat. A mellmagassági átmérő és a körlapösszeg; az aritmetikai átlagátmérő statisztikai mutatói a középkorú bükkös mintaterületeken.....	53
3. táblázat. A famagasság statisztikai mutatói a középkorú bükkös mintaterületeken; biológiai felsőmagasság.....	53
4. táblázat. Az átlagfa statisztikai mutatói középkorú bükkös mintaterületeken; hektáronkénti fatérfogat	54
5. táblázat. Elegyarány, hektáronkénti törzsszám, átlagos törzstávolság, folyónövedék, fatermési osztály idős bükkös mintaterületeken.....	55
6. táblázat. A mellmagassági átmérő és a körlapösszeg; az aritmetikai átlagátmérő statisztikai mutatói az idős bükkös mintaterületeken	55
7. táblázat. A famagasság statisztikai mutatói az idős bükkös mintaterületeken; biológiai felsőmagasság.....	56
8. táblázat. Az átlagfa statisztikai mutatói idős bükkös mintaterületeken; hektáronkénti fatérfogat	57
9. táblázat. Elegyarány, hektáronkénti törzsszám, átlagos törzstávolság, folyónövedék, fatermési osztály vegyeskorú bükkös mintaterületeken.....	58
10. táblázat. A mellmagassági átmérő és a körlapösszeg; az aritmetikai átlagátmérő statisztikai mutatói a vegyeskorú bükkös mintaterületeken	58
11. táblázat. A famagasság statisztikai mutatói a vegyeskorú bükkös mintaterületeken; biológiai felsőmagasság	59
12. táblázat. Az átlagfa statisztikai mutatói vegyeskorú bükkös mintaterületeken; hektáronkénti fatérfogat	60
13. táblázat. Elegyarány, hektáronkénti törzsszám, átlagos törzstávolság, folyónövedék, fatermési osztály a középkorú lucos mintaterületeken.....	61
14. táblázat. A mellmagassági átmérő és a körlapösszeg; az aritmetikai átlagátmérő statisztikai mutatói a középkorú lucos mintaterületeken.....	62
15. táblázat. A famagasság statisztikai mutatói a középkorú lucos mintaterületeken; biológiai felsőmagasság.....	62
16. táblázat. Az átlagfa statisztikai mutatói középkorú lucos mintaterületeken; hektáronkénti fatérfogat	63
17. táblázat. A koronarészarányok közti eltérések az egyes mintaterületeken a Kruskal-Wallis teszt számított p-értékei szerint	65
18. táblázat. A koronakezdet-magasságok közti eltérések az egyes mintaterületeken a Kruskal-Wallis teszt számított p-értékei szerint.....	66
19. táblázat. Az állandósult talajinfiltrációs ráta (mm/h) méréseinek eredményei a Szent Anna-tónál	70

20. táblázat. Az állandósult infiltrációs ráta (mm/h) leíró statisztikái az egyes faállomány-típusokban és földhasználati kategóriákban	71
21. táblázat. Az egyszempontos varianciaanalízis eredménye az állandósult infiltrációs ráták tekintetében.	71
22. táblázat. A Tukey Unequal N HSD teszt eredményei az egyes faállomány kategóriákra .	72
23. táblázat. Az egyes földhasználati kategóriák közti állandósult infiltrációs ráták közti különbségek. A Kruskal-Wallis teszt számított p-értékei	72
24. táblázat. A talajtömörödés közti különbségek az egyes földhasználati kategóriákban. A Kruskal-Wallis próba számított p értékei	74
25. táblázat. A többváltozós lineáris regresszió statisztikai mutatói	78
26. táblázat. A többváltozós lineáris regressziós modell együtthatói	78
27. táblázat. A szabad víz megjelenési gyakoriságai az egyes fafaj- és állományszerkezet-kategóriákban	84
28. táblázat. Szabad víz megjelenés időpontjai és a megelőző 72 óra mért csapadékmennyiségei	85
29. táblázat. Az egyes fafaj- és állományszerkezet-kategóriák mintaterületeinek X^2 homogenitásvizsgálat eredményei.....	86
30. táblázat. X^2 függetlenségvizsgálat kategóriapáronként végzett összehasonlításainak eredményei	86

Ábrák jegyzéke

1. ábra. A vizsgálati terület, a Szent Anna-tó krátere.....	11
2. ábra. A Szent Anna-tó belső kráterlejtőjén előforduló ökoszisztéma-típusok a hatályos erdészeti üzemterv szerint	17
3. ábra. A Szent Anna-tó	23
4. ábra. A Szent Anna-tó belső kráterlejtőinek erdőrészelei a hatályos üzemterv szerint	31
5. ábra. Állományfelmérések mintaterületei a Szent Anna-tó kráterében.....	34
6. ábra. Különböző állományszerkezetek a Szent Anna-tónál	35
7. ábra. Talajinfiltráció mérési helyei a Szent Anna-tónál.....	38
8. ábra. Talajinfiltráció mérése bükk-lékben a Szent Anna-tónál	40
9. ábra. Meteorológiai mérések a Szent Anna-tónál	45
10. ábra. A szabad víz megjelenési gyakoriságának mérési pontjai a Szent Anna-tó kráterében	48
11. ábra. Talajnedvesség adatrögzítője a Szent Anna-tónál.....	49
12. ábra. A törzszám átmérő szerinti eloszlása középkorú bükkös mintaterületeken.....	53
13. ábra. A faegyedek Kraft-féle osztályozás szerinti eloszlása középkorú bükkös mintaterületeken.	54
14. ábra. A törzszám átmérő szerinti eloszlása idős egykorú bükkös mintaterületeken.....	56
15. ábra. A faegyedek Kraft-féle osztályozás szerinti eloszlása idős bükkös mintaterületeken.	57
16. ábra. A törzszám átmérő szerinti eloszlása a vegyeskorú bükkös mintaterületeken.	59
17. ábra. A faegyedek Kraft-féle osztályozás szerinti eloszlása vegyeskorú bükkös mintaterületeken.	60
18. ábra. A törzszám átmérő szerinti eloszlása középkorú lucos mintaterületeken.....	62
19. ábra. A faegyedek Kraft-féle osztályozás szerinti eloszlása középkorú lucos mintaterületeken.	63
20. ábra. Koronarészarányok az egyes állománykategóriák mintaterületein a talajnedvesség mérési helyein	64

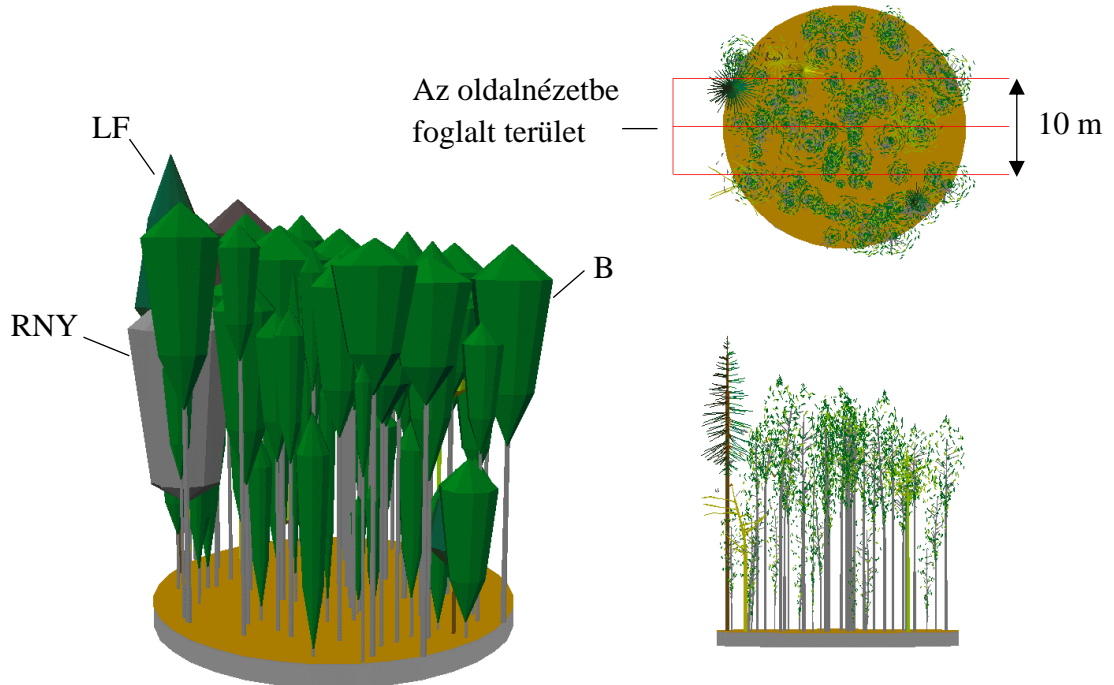
21. ábra. Koronakezdet-magasságok az egyes állománykategóriák mintaterületein a talajnedvesség mérési helyein	66
22. ábra. A földhasználati mód és a faállományok hatása a talaj állandósult infiltrációs rátájára a Szent Anna-tó kráterének belső lejtőin.....	71
23. ábra. Az állandósult infiltrációs ráta és a talaj homok-, szervesszén-tartalma, tömörsége, váztartalma és térfogattömege közti korrelációk.....	73
24. ábra. A modellezett napi vízszintváltozások reziduálisainak hisztogramja	79
25. ábra. A modellezett változás és a reziduálisok kapcsolata.....	79
26. ábra. A megfigyelt és modellezett napi vízszintváltozások összehasonlítása a Szent Annátónál.....	80
27. ábra. A csapadék, párolgás és vízszintváltozás havi összegeinek hisztogramja	80
28. ábra. Talajnedvesség alakulása a középkorú bükkös mintaterületeken	82
29. ábra. Talajnedvesség alakulása a középkorú lucos mintaterületeken.....	83
30. ábra. Talajnedvesség alakulása az idős bükkös mintaterületeken.....	83
31. ábra. Talajnedvesség alakulása az idős bükkös alatt kialakított lék mintaterületeken.....	83
32. ábra. Talajnedvesség alakulása a vegyeskorú bükkös mintaterületeken.....	84

Mellékletek jegyzéke

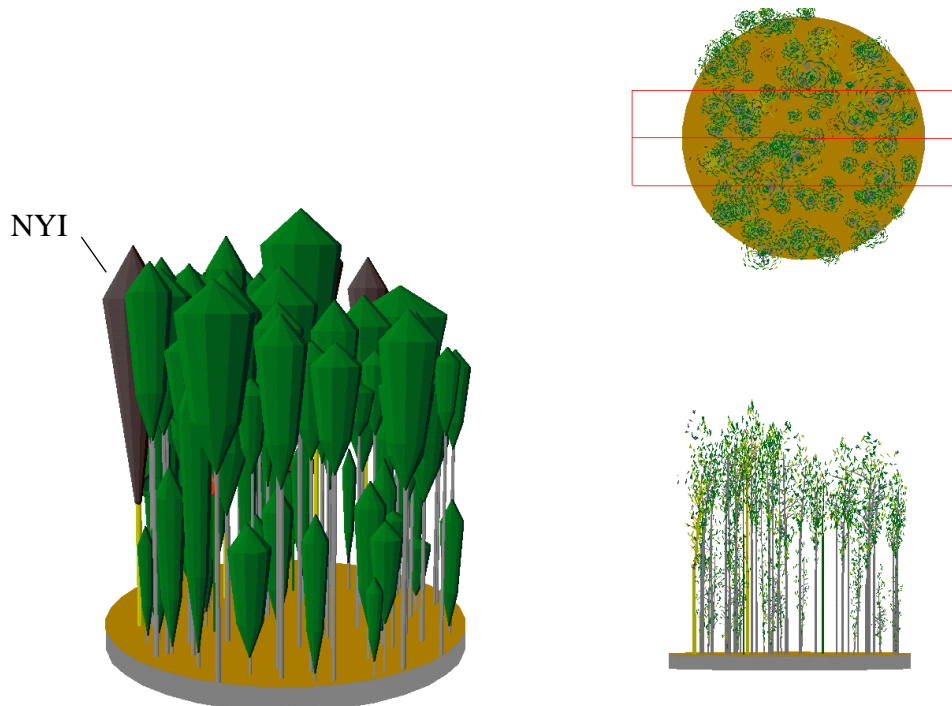
1. melléklet. A mintaterületek perspektivikus, felülnézeti és oldalnézeti faállomány reprezentációja	121
2. melléklet. A koronarészarány statisztikai mutatói a különböző állománykategóriákban ..	128
3. melléklet. A koronakezdet-magasság statisztikai mutatói a különböző állománykategóriákban	129
4. melléklet. A vizsgált talajtulajdonságok statisztikai mutatói a különböző faállomány és földhasználati kategóriákban.....	130

Mellékletek

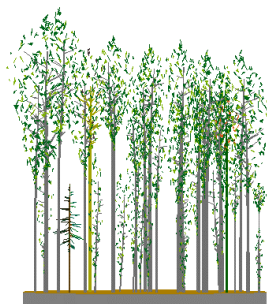
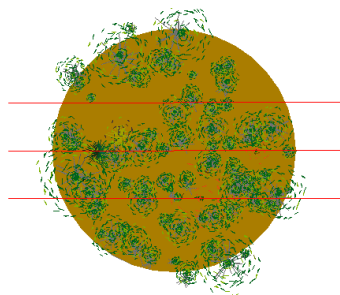
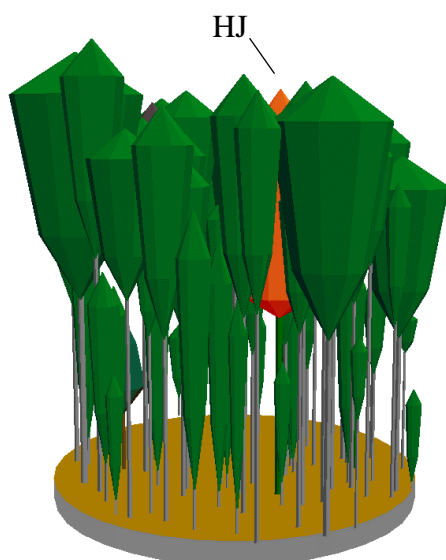
1. melléklet. A mintaterületek perspektivikus, felülnézeti és oldalnézeti faállomány reprezentációja (megjegyzés: a felülnézet a koronavetület koronaátmérő alapján végzett egyszerűsített ábrázolásának következtében nem nyújt hiteles képet a lombátor záródásáról)



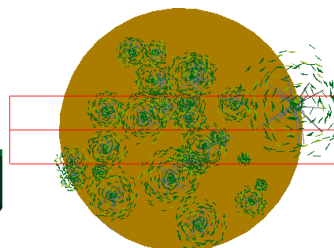
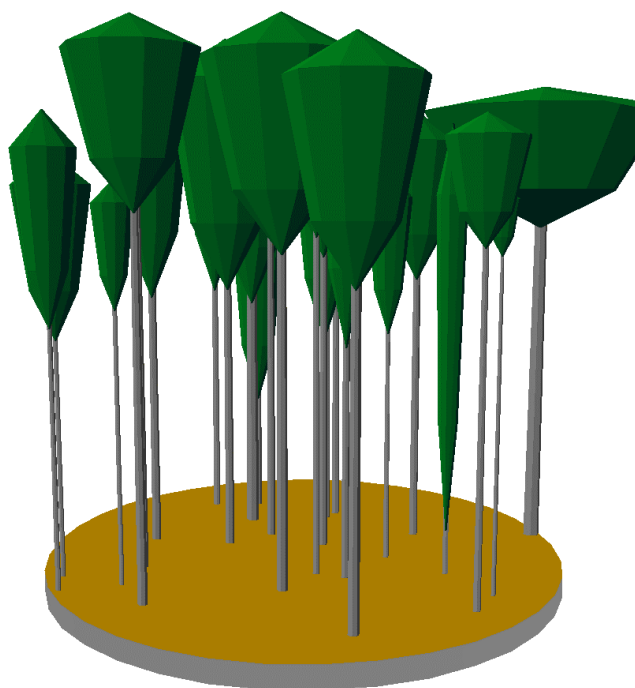
Középkorú bükkös: 1. mintaterület (B: bükk, LF: lucfenyő, RNY: rezgő nyár)



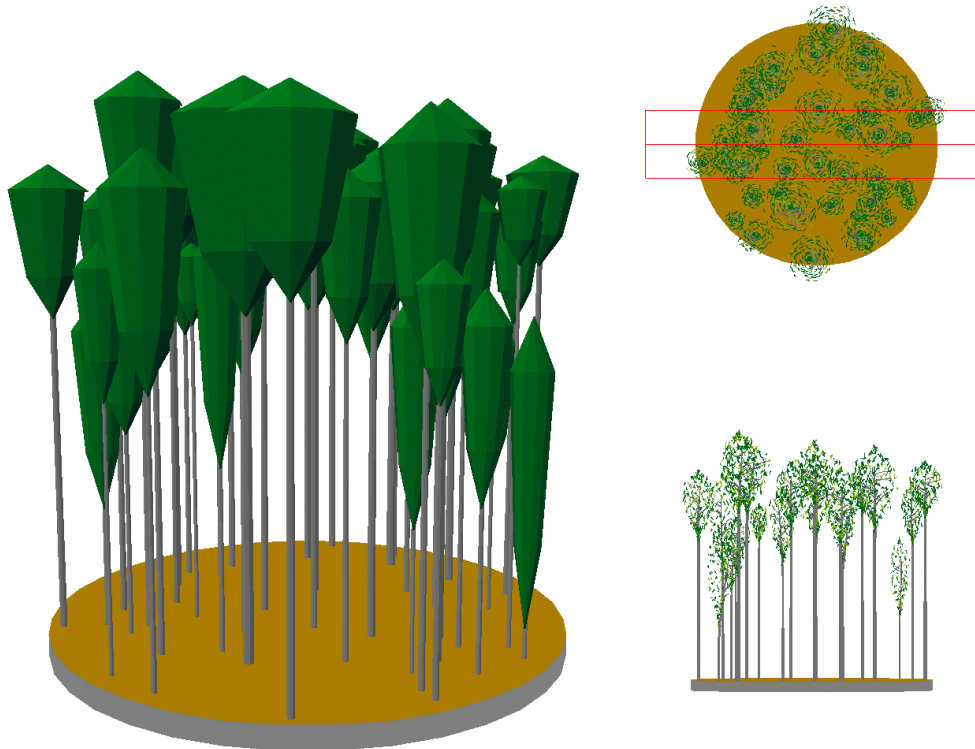
Középkorú bükkös 2. mintaterület (NYI: bibircses nyír)



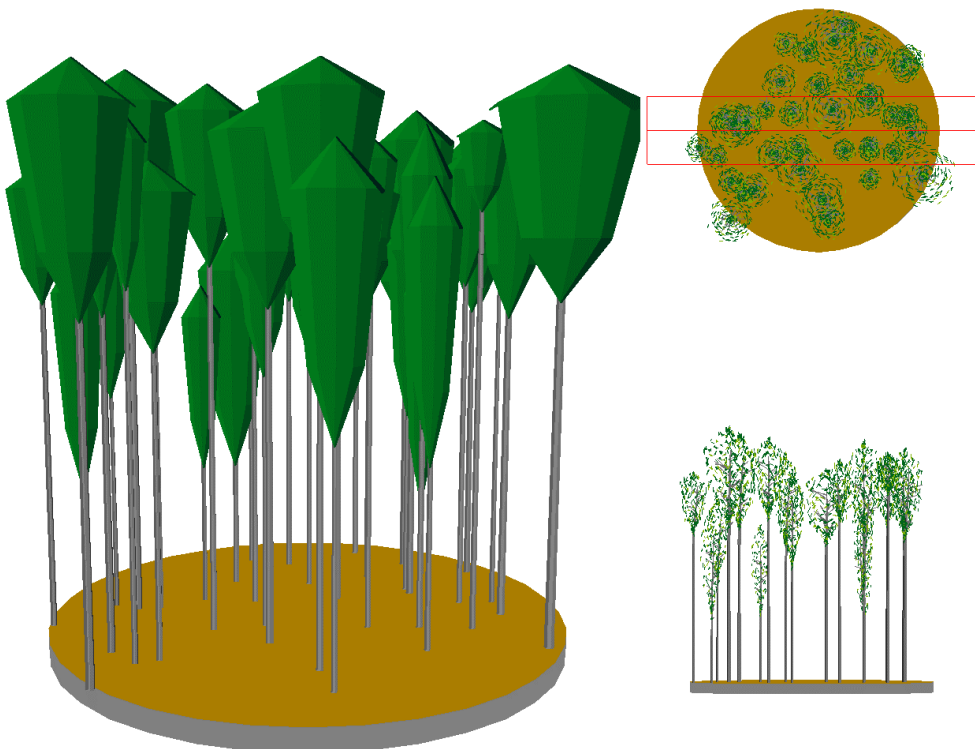
Középkorú bükkös: 3. mintaterület (HJ: hegyi juhar)



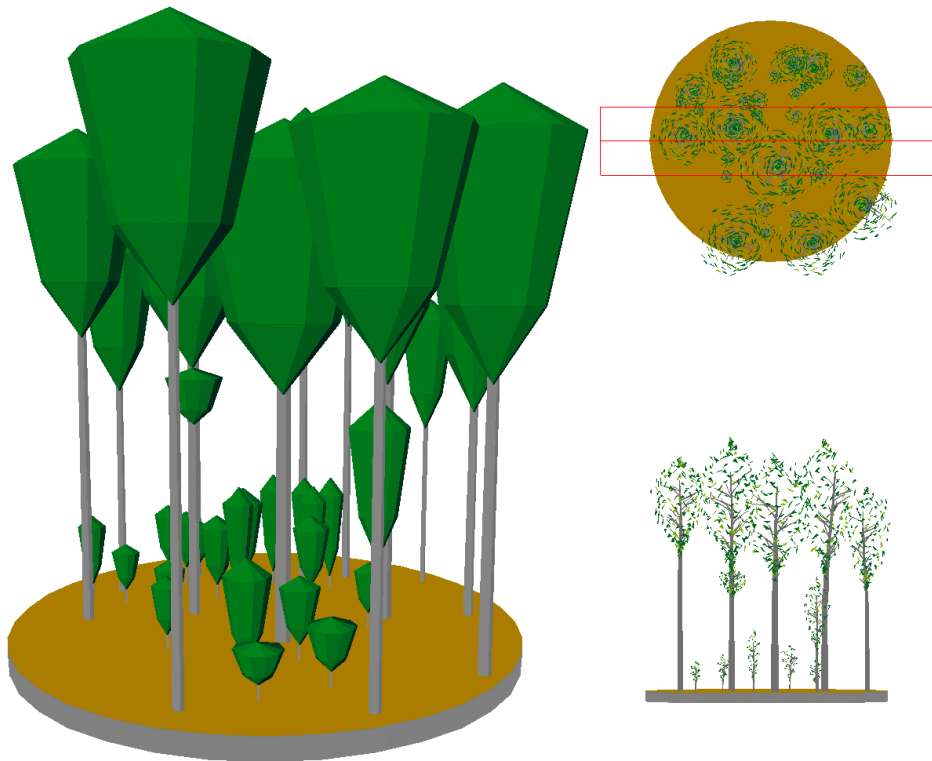
Idős bükkös: 9. mintaterület



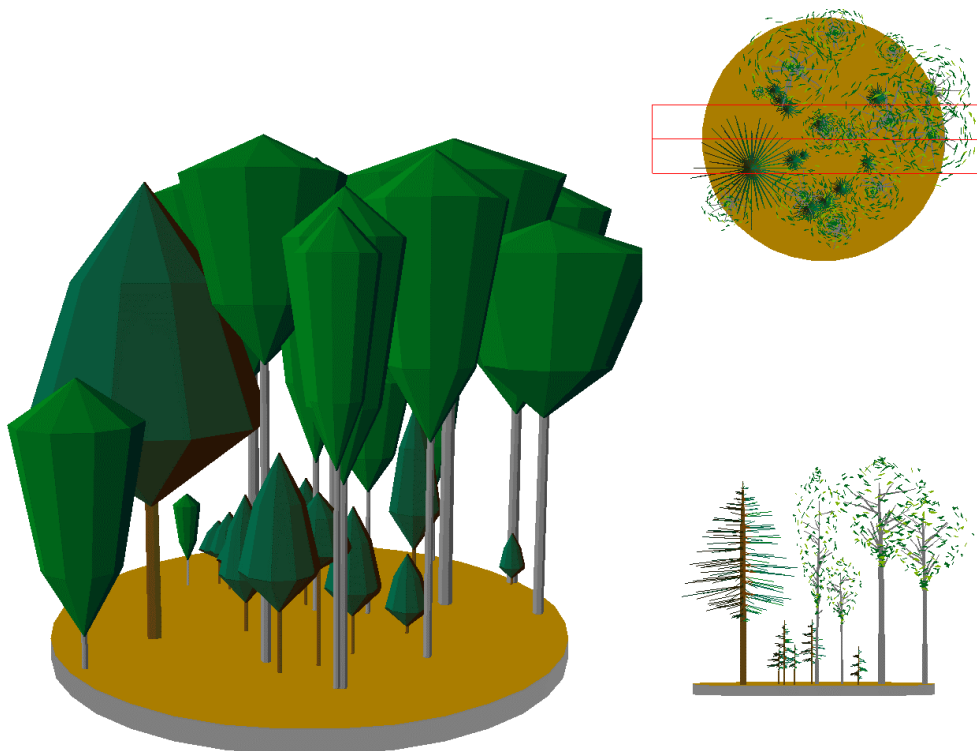
Idős bükkös: 10. mintaterület



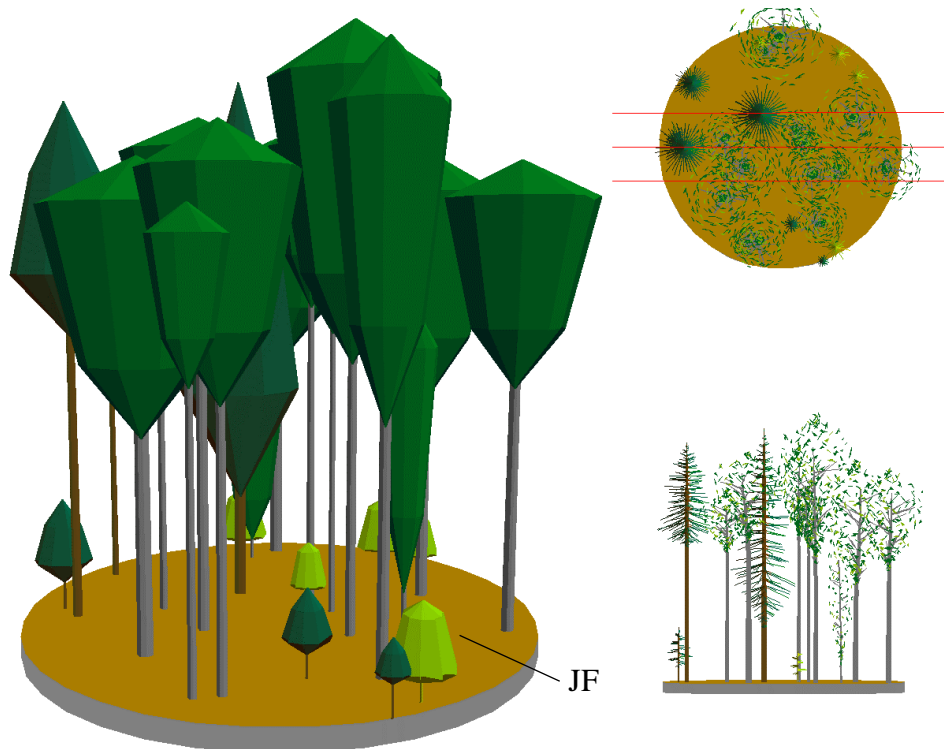
Idős bükkös: 7. mintaterület



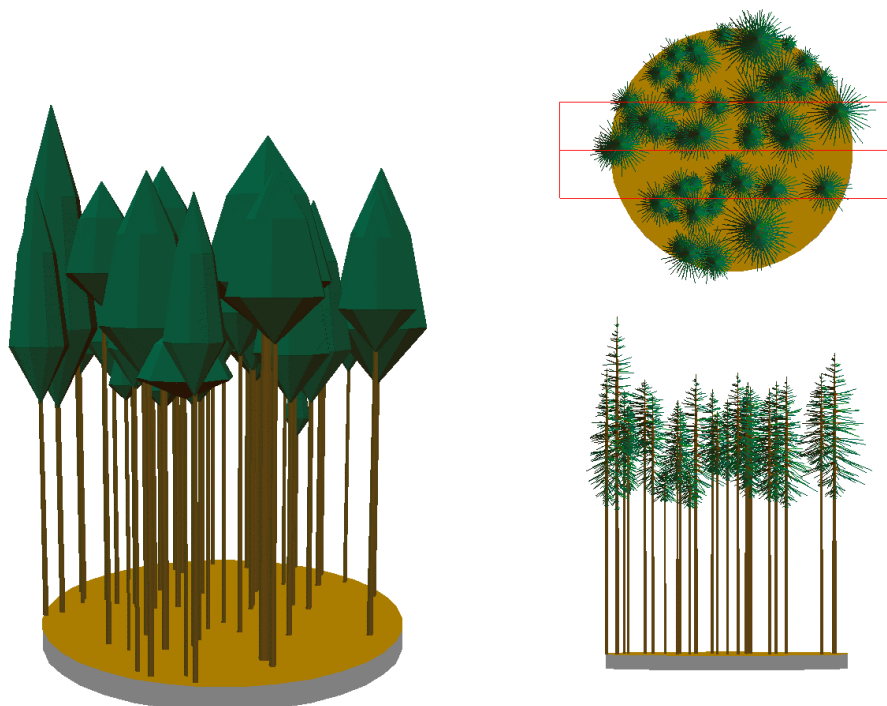
Vegyeskorú bükkös: 5. mintaterület



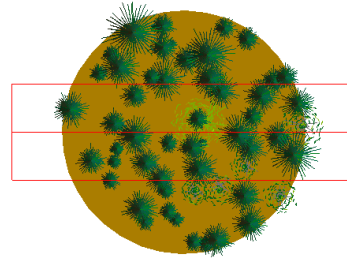
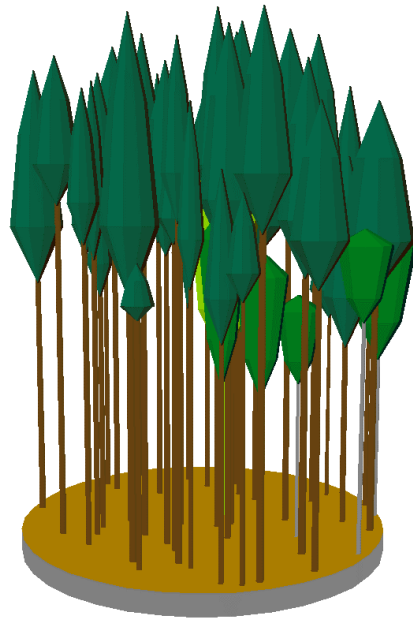
Vegyeskorú bükkös: 15. mintaterület



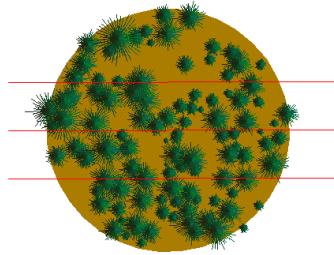
Vegyeskorú bükkös: 14. mintaterület (JF: jegenyefenyő)



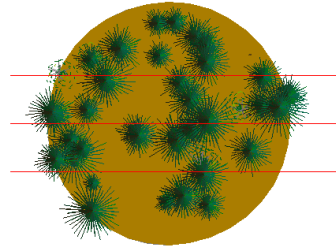
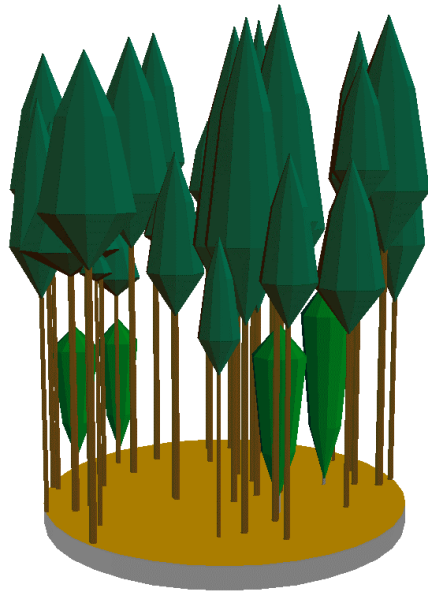
Középkorú lucos: 13. mintaterület



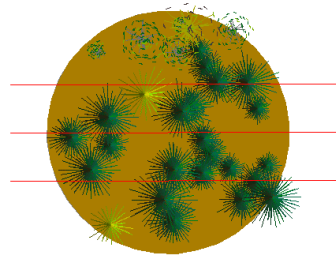
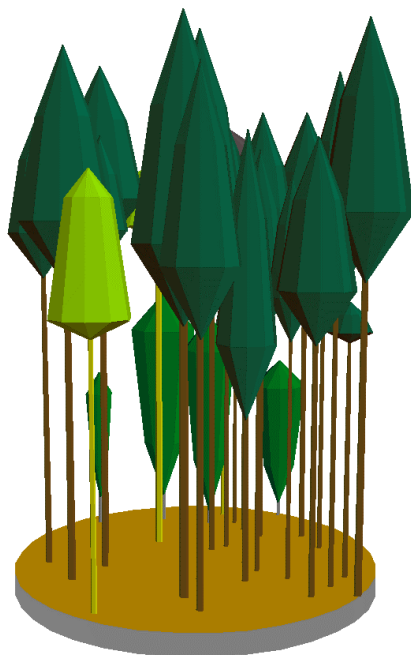
Középkorú lucos: 4. mintaterület



Középkorú lucos: 13. mintaterület



Középkorú lucos: 16. mintaterület



Középkorú lucos: 17. mintaterület

2. melléklet. A koronarészarány statisztikai mutatói a különböző állománykategóriákban

Középkorú bükkös					
Mintaterület	Fa-egyed (db)	Koronarészarány átlaga (%)	Minimum (%)	Maximum (%)	Szórás (%)
1.	84	51,5	26	97	21,0
2.	107	56,9	10	96	23,7
3.	74	57,1	25	96	20,6
Átlag	88	55,2	20,3	96,3	21,8
Idős bükkös					
Mintaterület	Fa-egyed (db)	Koronarészarány átlaga (%)	Minimum (%)	Maximum (%)	Szórás (%)
9.	26	41,2	16	90	14,5
10.	44	38,2	18	91	13,2
7.	38	41,1	17	67	11,3
Átlag	36	40,2	17,0	82,7	13,0
Vegyeskorú bükkös					
Mintaterület	Fa-egyed (db)	Koronarészarány (%)	Minimum (%)	Maximum (%)	Szórás (%)
5.	35	65,8	22	89	19,1
15.	28	65,4	42	91	14,3
14.	26	58,6	29	90	20,0
Átlag	30	63,2	31,0	90,0	17,8
Középkorú lucos					
Mintaterület	Fa-egyed (db)	Koronarészarány (%)	Minimum (%)	Maximum (%)	Szórás (%)
13.	54	34,3	18	58	8,1
4.	55	36,9	17	59	9,2
12.	106	25,1	3	44	8,8
16.	39	44,8	1	97	20,6
17.	31	47,1	14	94	21,5
Átlag	57	37,6	10,6	70,4	13,6

3. melléklet. A koronakezdet-magasság statisztikai mutatói a különböző állománykategóriákban

Középkorú bükkös					
Mintaterület	Faegyed (db)	Koronakezdet-magasság átlaga (m)	Minimum (m)	Maximum (m)	Szórás (m)
1.	84	10,5	0,5	17,4	5,3
2.	107	8,4	0,5	18,8	5,4
3.	74	8,7	0,5	15,6	5,0
Átlag	88	9,2	0,5	17,3	5,2
Idős bükkös					
Mintaterület	Faegyed (db)	Koronakezdet-magasság átlaga (m)	Minimum (m)	Maximum (m)	Szórás (m)
9.	26	18,8	3	25	5,0
10.	44	18,8	2	26	5,2
7.	38	19,1	8,4	27,8	4,8
Átlag	36	18,9	4,5	26,3	5
Vegyeskorú bükkös					
Mintaterület	Faegyed (db)	Koronakezdet-magasság átlaga (m)	Minimum (m)	Maximum (m)	Szórás (m)
5.	35	8,0	1	23,2	8,5
15.	28	7,2	0,5	18,6	6,0
14.	26	11,2	0,5	21,6	8,3
Átlag	30	8,8	0,7	21,1	7,6
Középkorú lucos					
Mintaterület	Faegyed (db)	Koronakezdet-magasság átlaga (m)	Minimum (m)	Maximum (m)	Szórás (m)
13.	54	17,2	10,8	22	2,0
4.	55	17,9	10,2	22,4	3,1
12.	106	15,2	10,8	18,7	1,5
16.	39	14,8	0,5	22	5,5
17.	31	15,3	1	22,8	6,6
Átlag	57	16,1	6,7	21,6	3,7

4. melléklet. A vizsgált talajtulajdonságok statisztikai mutatói a különböző faállomány és földhasználati kategóriákban

Tulajdonság	Faállomány és földhasználati kategória	Átlag	Min.	Max.	Szórás
Szervesszén-tartalom (%)	Lucos	5,1982	0,30	10,57	3,6430
	Idős bükkös	2,1380	0,36	3,76	1,2289
	Lék idős bükkösben	1,3750	0,09	2,67	1,1368
	Gyep	5,1370	0,09	16,37	4,5465
	Földút	3,4940	0,15	9,99	3,5862
Térfogattömeg (g/cm ³)	Lucos	0,4591	0,23	0,72	0,1852
	Idős bükkös	0,6720	0,43	0,81	0,1259
	Lék idős bükkösben	0,7380	0,57	0,84	0,0978
	Gyep	0,6410	0,33	1,25	0,2981
	Földút	0,6740	0,32	0,98	0,2509
Talaj-tömörtség (kg/cm ²)	Lucos	4,3636	3,00	9,00	1,7477
	Idős bükkös	8,0000	4,00	14,00	3,0551
	Lék idős bükkösben	8,3000	4,00	14,00	3,0930
	Gyep	16,1000	5,00	23,00	4,9542
	Földút	18,3000	8,00	28,00	7,3189
Váztartalom (tf%)	Lucos	6,3636	0,40	13,20	3,3963
	Idős bükkös	9,2800	7,20	11,20	1,4336
	Lék idős bükkösben	10,9600	7,20	16,00	2,7208
	Gyep	13,9600	1,60	32,80	9,1125
	Földút	17,6000	5,20	36,80	9,2799
Textúra (homok %)	Lucos	91,8746	83,53	97,14	3,6365
	Idős bükkös	95,6340	93,90	96,66	0,8595
	Lék idős bükkösben	94,0540	85,87	98,22	3,5171
	Gyep	95,4330	91,34	97,35	1,7758
	Földút	91,0860	81,37	96,62	5,0278