

## **A kutatás leírása:**

A kutatás elvégzéséhez a Soproni-hegység területén három gazdaságilag ill. ökológiailag fontos fafajunk megfelelő állományait jelöltük ki, az erdőtervi adatok és térképi anyagok előzetes beszerzésével és elemzésével. A vizsgálatba bevont fafajok (bükk, kocsánytalan tölgy és luc) a Soproni-hegység területén mind megtalálják természetes életterüket, ám a termőhelyi viszonyok következtében az itteni savanyú alapkőzetű erdei ökoszisztémák kisebb ellenállóképességűek a káros antropogén hatásokkal szemben, így érzékeny mutatói lehetnek annak.

Első lépésként az állományok termőhelyi viszonyainak meghatározását kezdtük meg. Mindhárom állományban 1-1 talajszelvényt nyitottunk meg, ezeknek megtörtént a helyszíni leírása és megmintázása. A helyszíni vizsgálatok során leírásra kerültek: a szintek száma, mélysége, fizikai talajfélesége, szerkezete, konkréciók, gyökerekkel való átszőtttség, termőrétteg mélysége. Mindhárom területen gyengén podzolos barna erdőtalajt találtunk, tipikus 3 szintes szelvényekkel, a savasodási folyamatok előrehaladtát jelző paraméterekkel.

A begyűjtött talajminták laboratóriumi elemzése során meghatározásra kerültek a legfőbb talajkémiai és talajfizikai paraméterek: pH, savanyúság  $y_1$  és  $y_2$  értékei, szerves anyag C- és N- tartalma, könnyen oldható foszfor és kálium mennyisége, adszorpciós viszonyok ill. a talaj aktív felszínein helyet foglaló legfontosabb tápanyagok mennyiségei, valamint az ásványi talajszemcsék méret szerinti eloszlása (mechanikai vizsgálat), Arany-féle kötöttség, higroszkóposság, 5 órás kapilláris vízemelés.

A három erdőállomány növekedésének nyomon követésére elvégeztük a faállományok adatainak felvételét. Ebbe tartozóan a vegetációs periódusok elején és végén (az eredetileg a vegetációs periódus közepére is tervezett felmérésre kapacitás hiányában nem került sor) megtörtént a fák törzsenkénti felvétele, a fmagasság és mellmagassági átmérő adatok rögzítésével. Hogy ezen növekedési adatokkal pontos számításokat tudjunk végrehajtani a fák által megkötött tápelem mennyiségekre vonatkozóan, mindhárom állományban elvégeztük egy-egy átlagos, uralkodó szociális helyzetű faegyed kidöntését és pontos biomassza mérését.

A faanyagból és a lombozatból méterenkénti felbontásban begyűjtött fatest- és levélmintákban meghatároztuk a fák biomasszájában tárolt tápanyag koncentrációkat és a tömegmérések alapján kiszámítottuk a tárolt mennyiségeket. Ezen mérések eredményeként a négy vegetációs időszakra vonatkozóan becsültük a tápanyag-körforgalomból a fatestben történő megkötés miatt átmenetileg kikerülő elemek mennyiségeit.

A kísérleti területek kiinduló állapotának jellemezését követően megtörtént a hosszú távú megfigyeléseket lehetővé tevő eszközök telepítése és ehhez kapcsolódóan a kutatás 4 éves időtartama alatt, a vegetációs időszakokban rendszeres mintavételezésekre került sor. A tápanyagkörforgalmak erdei ökoszisztémák viszonylatában fontos elemeként, a lehulló avar ill. ágakat összegyűjtő hálókkal kettő-négy hetes ritmusban gyűjtöttünk be mintákat, mennyiségeik meghatározásával.

Ezen mintavételekkel egyidejűleg történt egyes kijelölt fák leveleinek megmintázása. A mintavételezés során fényleveleket ill. –tüket gyűjtöttünk be, kijelölt fák sorozatos, ismételt megmintázásával. Az elemek tápelem-tartalmának laboratóriumi meghatározása által a vegetációs perióduson belüli idősorokat kaptunk.

A szén és nitrogén, de a többi tápelem erdei ökoszisztémán belüli körforgalmának fontos eleme az erdei avarból való feltáródásuk, a mineralizáció folyamatában. A lomb- illetve tűavar bomlásakor a növényi tápelemek vagy a talajba szivárgó csapadékvízben oldva, vagy a talajállatok és mikroorganizmusok általi lebontással szabadulnak fel belőle. A lebontás mérésére a kísérleti területeken zárt hálóba helyezett avar ill. tűminták tömegének veszteségét mértük. Ezen méréseinkkor igen nagy szórást tapasztaltunk az értékekben, amelyek következtében az állományokon belül és azok összehasonlításában sem tudtunk megállapítani statisztikailag biztos összefüggéseket.

Jóllehet, ez egy széles körben alkalmazott módszer az avar lebontásának természetes körülmények közötti megfigyelésére, alkalmazása során számos hiányosságát tártuk fel. Tapasztalataink szerint a hálóból a felaprózódott szerves anyag kisebb méretű fragmentjeinek jelentős része kihullott, ezt a mintázás során is észlelhettük. Ezen felül a tömegmérést jelentősen befolyásolhatta az is, hogy a kísérlet késői fázisában jelentős mennyiségben keveredett be szerves anyag a hálóba.

Az eredmények nagy szórása, valamint az, hogy a mikrobiális légzési intenzitásokkal nem lehetett semmilyen összefüggést kimutatni, arra is utalhat, hogy nem igaz a módszer alkalmazásához szükséges alapfeltevés, mely szerint a hálók tömegvesztése teljes mértékben a bennük elhelyezett lombminták teljes mineralizációjából adódik. Feltételezhető az, hogy a hálóból kihullott, távozott szerves anyagok egy része újra immobilizálódott a talaj szerves anyagában, jóval lassabban előrehaladva a tápelem körforgalomban.

A hálómintákkal szemben jól értékelhető eredményeket adtak a N-mineralizációra végzett inkubációs vizsgálatok és a talaj 1 méteres mélységében vett talajvíz minták ammónium és nitráttartalmának mérése, ill. a mélybe szivárgó víz mennyiségének becslése a kloridion tartalmak alapján (annak ellenére, hogy természetesen nem volt kizárható a fák gyökerei általi ammónium felvétel a gyökérszónában).

A nettó N-mineralizáció általánosan magas volt az avar- ill. tualom-szintben, és a talaj mélységével lefelé fokozatosan csökkent. A legintenzívebb számított N-mineralizáció mindhárom állományban az avarszintben (ill. tualomban) és a talaj legfelső 10 cm-ében zajlott, s az állományok értékei között is jelentős különbség volt tapasztalható (105 kg N/ha/év a tölgyes avarrétegében, míg csak 64 kg/ha/év a lucos tualomban). Mindhárom állományban a talaj 50-100 cm-es mélységében gyakorlatilag már nem zajlott nettó N-mineralizáció, ami arra utal, hogy ott vagy nagyon kevés a felvehető N, vagy nagyobb a mikrobiális igény N-nel szemben. A két lombos állomány ásványi talajának 0-10, 10-50 és 50-100 cm-ére számított N-mineralizációban nem jelentkeztek szignifikáns különbségek (avarszintben és az ásványi talajban 1 méteres mélységig összesen 173 és 168 kg N/ha/év), de mindkét állományban ezen értékek magasabbak voltak a lucosban a tualomban és 1 méteres mélységig számított összesen 105 kg N/ha/év értéknél.

A nettó nitrifikáció (a mineralizált N azon része, amely nitráttá alakult) pozitív korrelációt mutatott a talaj pH-értékével, vagyis a lucos állományban lassabban zajlott ez a folyamat, mint a két lombos állományban. Hasonlóan pozitív korrelációt tapasztaltunk a C/N arányokkal az avarszintben és az ásványi talaj felső szintjében is. Világosan igazolódott a feltevésünk, mely szerint a N-mineralizációs folyamatok erős gátlást szenvednek a talaj elsavanyodásának előrehaladásával. A nitrifikációra számított értékek szórása jóval nagyobb volt, mint a nettó N-mineralizációnál. Azt is fontos megjegyezni, hogy a nitrifikáció értékeknél (89 – 168 – 166 kg N/ha/év a lucos, bükkös és tölgyes állományok avarszintjére és 0-100 cm-es ásványi talajrétegre számolva) felülbecslését mutatják a valóságos értékeknek,

mivel a terepi, valós mintavételi körülmények között a talajnak ezen részét behálózó növényi gyökerek bizonyos mennyiségű ammóniumot képesek felvenni a talajoldatból, csökkentve ezzel a nitrifikáció értékét.

A csapadékvíz- és a benne oldott tápanyagok (pl. N-üledés) forgalmának felmérését szintén állandó jelleggel kiépített terepi felszerelések felszerelése biztosította. Ide értendők a fatörzsön lefolyó csapadékot összegyűjtő törzsgallérok, a fakoronákon áthulló ill. lecsöpögő csapadékot összegyűjtő edények, ill. a talaj különböző mélységű rétegeibe szivárgó talajvizet megmintázó szívógyertyák installálása.

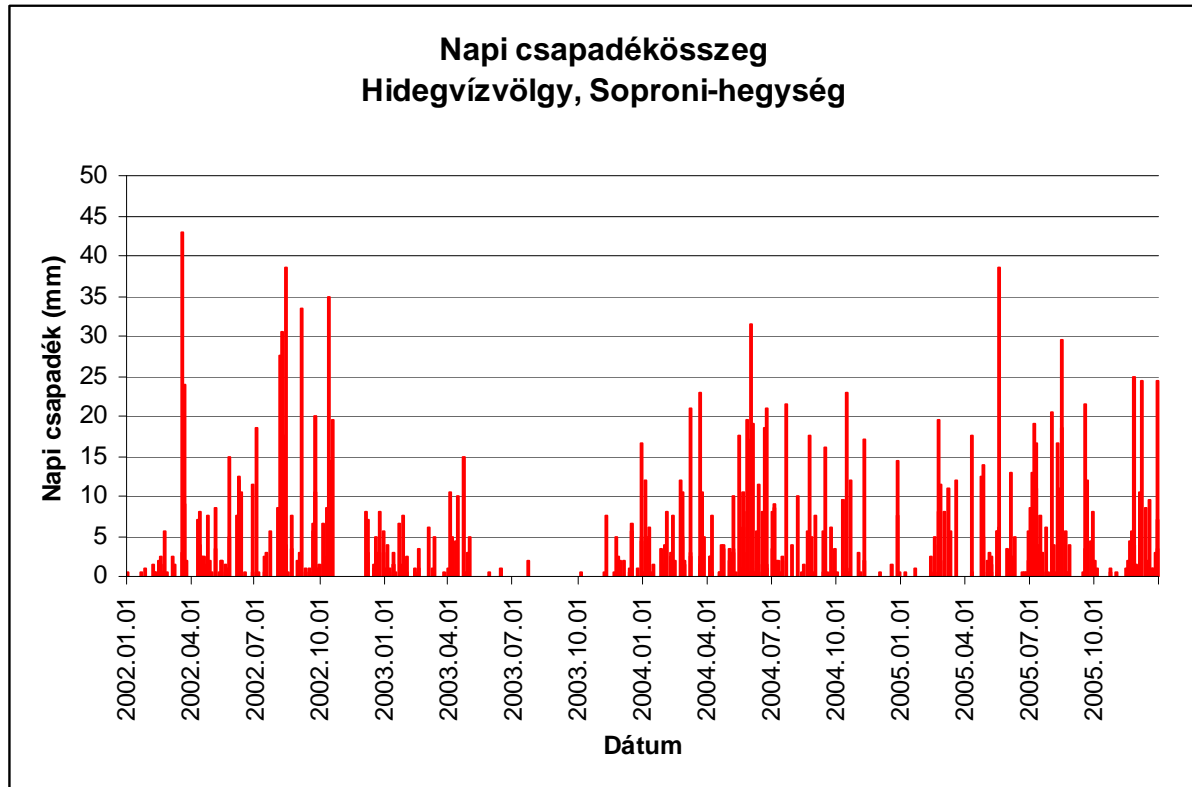
A talaj által tárolt nedvesség 0-5 cm, 10 cm, 50 cm és 1 m mélységből vett mintáiban szintén meghatározásra kerülnek a tápelemek mennyiségei. A talajban visszatartott víz mennyisége a kutatás bizonyos időszakában, különösen a 2003-as évben – egy több éves aszályos időszak eredményeként – annyira lecsökkent, hogy a mintavevő gyertyák csak a vegetációs periódus egy részében szolgáltatottak mintákat.

Az időjárástól kevésbé függő, a talaj vízháztartását állandó paraméterként jelző tényező az ásványi talaj szemcséinek mérettartomány szerinti eloszlása. A talajszelvényekben elvégzett mechanikai vizsgálatokhoz kapcsolódóan elvégeztük az ásványi talaj pórusterének vizsgálatát, pF-görbéik elkészítésével.

A talajban tárolható hasznos vízkészlet (diszponibilis víz) mennyisége nem különbözött jelentősen a három terület között, nagysága alapján előre számíthatóvá vált az a vízmennyiség, amelyet a talaj a téli csapadékból tartósan tárolni és a növényzet rendelkezésére bocsátani tud. A hasznosítható vízmennyiség ismerete alapján, valamint a klimatikus jellemzőkből (csapadékmennyiség, csapadék eloszlás, hőmérséklet, szél) számítható evaporáció és transzspiráció (együtt evapotranszspiráció) segítségével jobban előre jelezhetőek a szárazság okozta növényi stresszhelyzetek, vagyis az aszály okozta károk a növényzetben.

A kutatási időszakban a szén- és nitrogénkörforgalma a klimatikus tényezők egyidejű felmérésével, azok függvényében kerültek leírásra. A klimatikus adatok rögzítésére egy a bükkös állományban elhelyezett meteorológiai mérőtorony nyújtott lehetőséget. Ezen mérőtorony létesítését, üzemeltetését Tanszékünk más, kapcsolódó témájú projektek

támogatásával valósította meg. Az automata műszerek segítségével rögzítésre kerültek a legfontosabb meteorológiai adatok (léghőmérséklet, légnedvesség, szélesebbesség, sugárzás intenzitása, talajhőmérséklet). A rögzített adatok közül a napi csapadék mennyiségeit az 1. ábra szemlélteti.



1. ábra: Napi csapadékösszeg mm-ben kifejezve, 2002-2005 években, a Soproni-hegységben elhelyezkedő kísérleti állományainkban.

Az erdei ökoszisztémákban lejátszódó C-, N-körforgalmak során az erdei talaj ásványi összetétele jelentős szerepet játszik az egyes fázisok közötti átalakulás folyamataiban. A talajban felhalmozódó szerves humuszanyagok stabilitása ugyanis nagyban függ az ásványok típusától. A kutatás során lehetőség nyílt arra, hogy talajmintákat küldjünk a japán Okayama University of Science intézmény Department of Applied Physics intézetébe, ahol elvégezték ezen minták röntgen-diffrakciós vizsgálatát, differenciális termoanalízisét, valamint scanning elektronmikroszkópos felvételeket készítettek az ásványi struktúrákról. A háromféle vizsgálati módszer kombinációja nemzetközileg is új technikai lehetőségnek számít.

A talajok – a területről előzetesen begyűjtött geológiai információknak és a hagyományos talajkémiai vizsgálatok eredményeinek megfelelően – savanyú ill. erősen savanyú karaktert mutattak. A metamorf formációk és üledékes kőzetek alapanyagából fejlődött talajok egész profiljában főleg kvarc, muszkovit és albit van jelen. Ezen kívül kisebb mennyiségben előfordult anortit és mikroklín is, melyek metamorf kőzetekben jellemzőek.

Az erdők talajában élő mikroszervezetek milliárdjainak ökológiai összetételéről szerzett ismereteink – a baktériumokról, sugárgombákról és legfőképpen a gombákról – ugyan folyamatosan bővülnek, de a hazai források az erdei talajok esetében még mindig korlátozottak. Munkánk ezért hangsúlyozottan kiterjedt a talajban lejátszódó mikrobiológiai tevékenységek aktivitásának, ökológiájának leírására.

A talajfizikai és kémiai paraméterek, a talaj ásványi összetételének vizsgálata és az egyéb termőhelyi tényezők (csapadék, klíma) alapján mindhárom állományban előrehaladott talajsavanyodási folyamatok lezajlására következtethettünk.

A talajfizikai és talajkémiai paraméterek azonban különbségeket is kimutattak a három állomány között. Míg a kémiai paraméterek alapján mindhárom területen a savanyú alapkőzet határozta meg a talaj tulajdonságait, addig összehasonlításukban a lombos állományokban kevésbé előrehaladott savasodási folyamatokat tapasztaltunk. Míg a bükkösben és tölgyesben is a savanyú kémhatás mellett alacsony bázistelítettség jelezte a tápanyagháztartás kedvezőtlené válását, addig a lucosban az erősen savanyú talaj és a kritikus 15%-os bázistelítettség ennél is kedvezőtlenebb képet mutatott. Szerepe lehetett ebben a talajok szöveti összetétele közötti különbségnek, ugyanis a lucosban az agyag és iszap frakció jóval kisebb arányt tett ki, ami a víz- és tápanyagháztartásban jelent hátrányt.

A talajfizikai és talajkémiai mérési eredmények ismeretében a mikrobiológiai vizsgálatok célja az volt, hogy kimutassuk, vajon volt-e kimutatható hatása ezen tényezőknek a mikrobiális lebontás aktivitására, valamint hogy megvizsgáljuk, vannak-e kimutatható különbségek az egyes állományok között. A mikrobiológiai és a talajfizikai, talajkémiai paraméterek között különféle statisztikai módszerekkel kerestünk összefüggéseket.

A három állományban vett talajmintákon a mikrobiológiai aktivitás mérésével a lebontás sebességének összehasonlítására került sor. Ehhez a *természetes talajlégzést* mértük az alapállapotú lebontási aktivitás meghatározására. Az alaplégzés a talajban aktuálisan metabolikus tevékenységet kifejtő mikrobák aktivitásáról ad információt.

Ahogy azonban azt számos vizsgálatban már kimutatták, a talajban jóval nagyobb arányban vannak jelen inaktív, metabolizmust csak minimális mértékben kifejtő mikrobák. Ennek a szunnyadó potenciálnak a felmérésére optimális körülményeket kellett előállítani a talajban: a könnyen hasznosítható *szubsztrát (glükóz) indukálta talajlégzés* vizsgálata, a potenciális maximális lebontási intenzitást jellemezte a három vizsgált állomány talajaiban.

A mikrobiális légzés aktuális és potenciális nagyságrendjének meghatározása mellett fontos volt a teljes jelenlévő *mikrobiális biomassza* nagyságának meghatározása. Ezen paraméterek együttes ismerete alapján tudtuk ugyanis meghatározni az erdei talaj felszínén felhalmozódó szerves anyagok (ágak, levelek, elhalt talajállatok teste) lebontásának intenzitását, az egyes állományokra vonatkozóan külön-külön, illetve azok összehasonlításában.

A mikrobiális biomasszát két különböző módszerrel is meghatároztuk. Egyrészt felhasználtuk a *glükóz indukálta talajlégzés értékeit*, másrészt *lipid-foszfát mérésekkel* számoltunk vissza a talajból kivont szerves anyagok mennyiségéből az élő mikrobiális biomasszára.

A mikrobiális aktivitás és biomassza mérésekhez kapcsolódóan elvégeztük a talaj felső, 10 cm-es, humuszos ásványi rétegének kemotaxonómiai vizsgálatát is. Mindhárom területen steril üvegedényekbe, steril módon talajmintákat vettünk a felső, 20 cm-es humuszos ásványi talajszintből. Ezen mintákban határoztuk meg a három erdei talajunk mikrobiális közösségeinek összetételét, struktúráját. Feldolgozásukra Budapesten, az Eötvös Loránd Tudományegyetem Természettudományi Karának Mikrobiológiai Tanszékén került sor.

Az alkalmazott módszer egy újonnan fejlesztett módszer alapján történt, melynek előnye, hogy egyugyanazon mintából, egyazon extrakciót követően lehet meghatározni a foszfolipid-zsírsv-profilokat (PLFA) és a jelenlévő respiratórikus kinonok (RQ) típusait, mennyiségeit. Mindkét molekula csoport képviselői specifikus biokémiai alkotóelemek, ún.

„szignatúra” vegyületek, melyek a mikrobiális közösségen belül egy adott csoporthoz rendelhetők, és analízisük értékes információkat nyújthat számunkra a közösség összetételéről.

Az állományok mikrobiális közösségi összetételéről nyert eredményeket, az azok közötti eltéréseket statisztikai módszerekkel elemeztük: főkomponens analízist és hierarchikus klaszteranalízist végeztünk el. A statisztikai módszer célja az volt, hogy többféle változó (jelen esetben a talaj fizikai-, kémiai paraméterei, a mikrobiális aktivitási értékek valamint a mikrobiális közösségi jellemzők, a különböző poliizoprén láncú kinonok ill. a poláris lipid-zsírsavak mennyiségei és arányai) közül kiemelje azokat, amelyek a legerősebben magyarázzák az állományok vizsgált paraméterekben tapasztalt különbözőségét. Ezen felül cél volt az is, hogy a sokféle változó helyett lehetőleg minél kevesebb, akár újonnan képzett, komplex változókkal jellemezzük a mintáinkat. Az alkalmazott statisztikai módszereknek előnye volt az is, hogy kétdimenziós térben képezték le az összefüggéseket úgy, hogy a minták elkülönítése könnyen áttekinthetően került ábrázolásra.

Mikrobiológiai szempontból a talajfizikai és talajkémiai paraméterektől valamelyest eltérő módon különültek el állományaink. Amellett, hogy a talajkémiai és –fizikai paraméterek a lucos állomány alatt valamivel előrehaladottabb talajsavanyodást mutattak, ennek a talajállapotnak megfelelően, a két lombos állományban az avar és az ásványi talaj 0-10 cm-es rétegének együttes metabolikus aktivitása és mikrobiális biomasszája szignifikánsan magasabb volt, mint a lucfenyvesé.

Ezzel szemben az előző két paraméter hányadosaként képzett mikrobiális kvóciens a lucos avarszintjében és ásványi talajában is magasabb volt. Ebből arra következtetünk, hogy a kedvezőtlenebb körülmények között nemcsak a mikrobiális folyamatok volumene, de a szénforrásként rendelkezésre álló szubsztrátumok hasznosításának hatékonysága is lecsökkent. Megerősíteni látszik az elkülönítést a statisztikai elemzés is, amely a lucfenyvest, talajának aktuális savanyúsága és a mikrobiális aktivitás és biomassza (BAS, SIR, PO<sub>4</sub>-C<sub>mic</sub>) alapján különítette el leginkább.

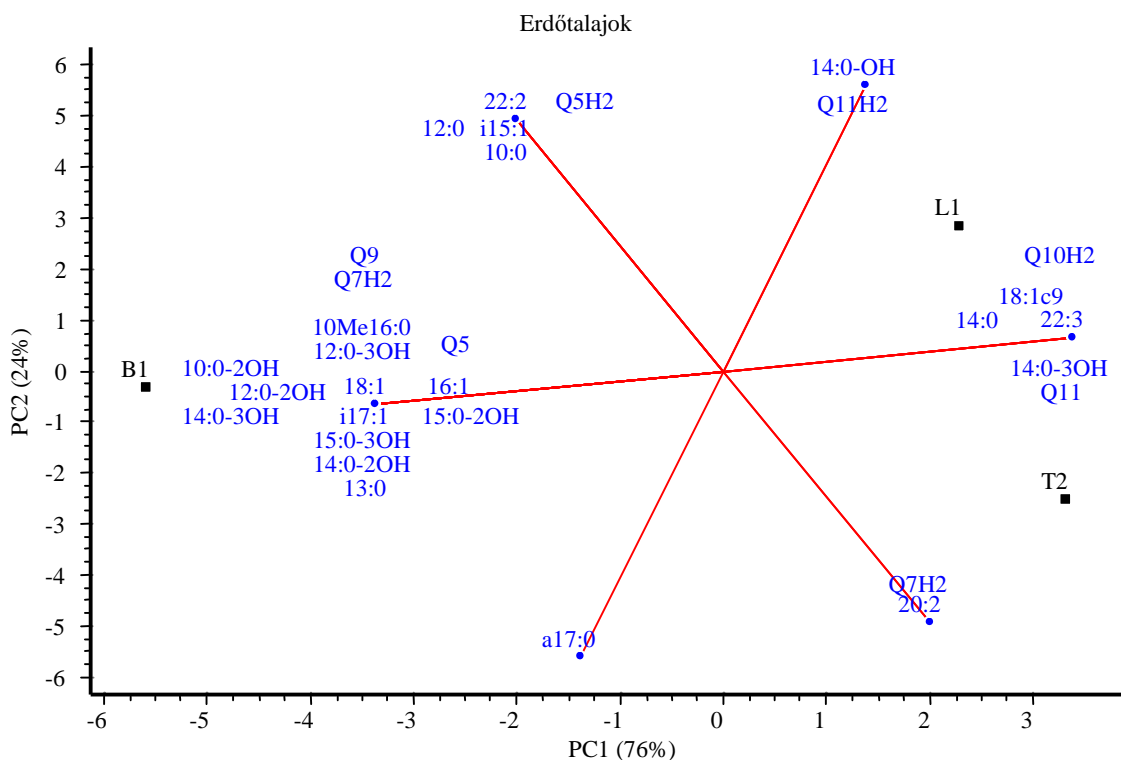
A mikrobiális közösségek összetétele alapján a bükkös válik el legjobban, míg a lucfenyves és a tölgyes állományok egymástól kevésbé különülnek el. A bükkös talajában a fakultatív és obligát anaerobok jelenléte az avartakaró kompaktabb szerkezetével, az ásványi



talajfelszín levegőtől való erősebb elzárásával lehet összefüggésben. A lucosban és tölgyesben inkább aerob körülményekre utaló mikrobák, eukarióta egysejtűek és cianobaktériumok fordultak elő nagyobb számban, valamint a mikrogombák markerei voltak jellemzőek. Az eredményekből eredő azon feltevésünk igazolására, hogy a lucosban a mikrobiális anyagcsere-folyamatok volumenének és hatékonyságának csökkenése a gomba/baktérium arányok növekedésével állhat kapcsolatban, további vizsgálatok (pl. SI-módszer, ergoszterol vizsgálatok) elvégzését indokolja.

Eredményeink azt mutatták, hogy az erdőállományok ökológiai vizsgálatához soha nem elegendő csak a talajok fizikai-kémiai paramétereinek leírásával megelégedni, hasonlóan fontos a kiegészítő mikrobiális vizsgálatok elvégzése is, illetve ez fordítva is igaz.

A mikrobiális közösségek összetétele alapján a bükkös válik el legjobban (2. ábra), míg a lucfenyves és a tölgyes állományok egymástól kevésbé különülnek el.



2. ábra: A bükkös (*Fagus sylvatica*: B1), lucos (*Picea abies*: L1) és kocsánytalan tölgyes (*Quercus petraea*: T2) területek felső, 10 cm-es, humuszos ásványi talajrétegei, poláris lipid-zsír-sav (PLFA) és respiratórikus kinon (RQ) mintázatainak értékelése, főkomponens analízissel.

A bükkös talajában a fakultatív és obligát anaerobok jelenléte az avartakaró kompaktabb szerkezetével, az ásványi talajfelszín levegőtől való erősebb elzárásával lehet összefüggésben. A lucosban és tölgyesben inkább aerob körülményekre utaló mikrobák, eukarióta egysejtűek és cianobaktériumok fordultak elő nagyobb számban, valamint a mikrogombák markerei voltak jellemzőek. Az adatainkon alapuló azon feltevésünk igazolása, hogy a lucosban a mikrobiális anyagcsere-folyamatok volumenének és hatékonyságának csökkenése a gomba/baktérium arányok növekedésével állhat kapcsolatban, további vizsgálatok (pl. SI-módszer, ergoszterol vizsgálatok) elvégzését indokolja.

Eredményeink egyben bizonyították, hogy az erdőállományok ökológiai vizsgálata során indokolt a talajok fizikai-kémiai paramétereinek leírásán túlmenően, a hasonlóan fontos, mikrobiális vizsgálatok elvégzése is.

A kutatási programban az OTKA támogatásával, a Soproni-hegyvidéken kiépítettünk három olyan kísérleti területet, amelyekben az Egyetemünk Erdőmérnöki Karának okleveles erdőmérnöki, okleveles környezetmérnöki, okleveles környezettudományi, vadgazda mérnöki és természetvédelmi mérnöki szakos hallgatói képzésük során megismerkedhetnek az alkalmazott kutatási módszereinkkel, infrastruktúrával.

Az F38361 számú OTKA kutatási pályázathoz kapcsolódóan a témavezetőnek több más sikeres pályázata is kapcsolódott az utóbbi években (M 36750 OTKA műszerpályázat, OMFB-00062/2003 OM műszerpályázat, MTA Bolyai kutatói ösztöndíj pályázat). A projekt támogatásával kiépített kísérleti területeken a jövőben tovább kívánjuk folytatni a mérések egy részét, ill. újabb pályázati források révén további, kapcsolódó tematikájú vizsgálatot kívánunk rajtuk elvégezni.