

Picea abies és *Pinus mugo* fafajok egészségi állapotának vizsgálata a Wechsel-hegység természetközeli erdőállományaiban

Falvai Dominika¹, Baltazár Tivadar², Szegleti Zsófia¹
és Czóbel Szilárd^{1,*}

¹Szent István Egyetem, Természetvédelmi és Tájgazdálkodási Tanszék,
2100 Gödöllő, Páter Károly u. 1.

²Mendelova univerzita v Brně, Agronomická fakulta, Ústav agrochemie, půdoznalství,
mikrobiologie a výživy rostlin, Zemědělská 1665/1, 613 00 Brno, Česká Republika
E-mail: Czobel.Szilard@szie.hu

Összefoglaló: Számos klimatikus modell a hőmérséklet jelentős emelkedését prognosztizálja a hegyvidéki régiókban, amely más tényezőkkel együtt befolyásolhatja a montán fajok eloszlását és az itteni életközösségek összetételét. A hegyvidéki területeken eddig észlelt, illetve előrejelzett termofilizáció felgyorsíthatja az erdőalkotó fásszárúak elterjedésének magasabb térszinek felé történő elmozdulását az Alpokban. Kutatásunk során arra kerestük a választ, hogy az ausztriai Wechsel-hegység montán és szubalpin zónájában a domináns tülevelű fajok egészségi állapota hogyan változik egy magassági transzekt mentén. A terepi méréseket ArborSonic FAKOPP 3D akusztikus tomográf és ArborElectro impedancia tomográf segítségével végeztük el, amelyek roncsolásmentesen képesek megállapítani a korhadt részek kiterjedését és pontos elhelyezkedését, illetve a gombafertőzöttség mértékét és lokalizációját. Mind a közönséges lucfenyő (*Picea abies*), mind a havasi törpefenyő (*Pinus mugo*) esetében szignifikáns, de részben eltérő jellegű összefüggést találtunk a korhadság mértéke és a tengerszint feletti magasság között. A lucos övben a romlottsági értékekre illesztett trendvonal haranggörbe jellegű lefutást mutatott. A lucfenyő szignifikánsan korhadtabbnak bizonyult elterjedésének alsó magassági területén, ami alapján a lucos zóna areájának szűkülése valószínűsíthető a vizsgált területen. Ez természetvédelmi szempontból nem túl kedvező, hiszen a *Picea abies* domináns, állományalkotó fafaj, emiatt a komplett lucos élőhely beszűkülése több, az élőhelyhez köthető, kisebb ökológiai alkalmazkodó-képességgel jellemezhető faj esetében negatív következményekkel járhat.

Kulcsszavak: lucfenyő, törpefenyő, magassági transzekt, korhadság, gomba-fertőzöttség

Bevezetés

A világszerte tapasztalható éghajlati melegezés az eddigi mérések szerint a hegyvidéki ökoszisztémákat nagyobb mértékben érinti, mint az alacsonyabban fekvő

régiókat (IPCC 2007). Ebben az évszázadban végzett klíma-mérések alapján a hegyvidéki területek hőmérséklet-növekedésének üteme két-háromszor nagyobb, mint a 20. században (Nogués-Bravo *et al.* 2007, Wipf *et al.* 2013). Emellett egyre több bizonyíték van arra, hogy a felmelegedés sebessége növekszik a vertikális magassággal. A felmelegedés tengerszint feletti magasságtól függő eltérő sebessége a különböző magassági régiókban eltérő mértékben gyorsítja fel az ökoszisztémák változásának ütemét (Pepin *et al.* 2015). A felmelegedés valószínűleg befolyásolja a hegyvidéki erdők biodiverzitását és ökoszisztéma-szolgáltatásait is (Máliš *et al.* 2016). Előbbi egyes fajok eltűnésével és a társulások összetételének megváltozásával járhat (Nogués-Bravo *et al.* 2007).

1951 óta minden évtizedben átlagosan 2,7 nappal meghosszabbodik a vegetációs időszak (Defila & Clot 2005, OcCC 2008), ami lehetővé teszi a növények számára, hogy egyre magasabban lévő területeken terjedjenek el (Lenoir *et al.* 2008). Mivel a fák megtelepedését és növekedését az alacsony hőmérséklet limitálja (Liang *et al.* 2016), a felmelegedés várhatóan felfelé tolja majd az erdők, és ezzel az alpesi fahatár és számos faj elterjedését (Vittoz *et al.* 2013, Bussotti *et al.* 2015, Máliš *et al.* 2016). Ezzel párhuzamosan a fafajok elterjedésének alsó (szárazsági) határán a felmelegedés-okozta erőteljes stressz-szelekció a genetikai diverzitás és a stabilitás csökkenésével járhat. Azonban a klímaváltozásnak az európai erdők fainak jövőbeni növekedésére és egészségi állapotára gyakorolt hatása egyelőre tisztázatlan (Mátyás & Kramer 2016). Északnyugat-Kanadában a magassági fahatáron végzett kutatások kimutatták, hogy 11,3 °C-os júliusi-augusztusi átlaghőmérséklet optimális a fák növekedése szempontjából. Amennyiben ezen hónapok átlagos értéke meghaladja ezt a küszöbértéket, az évgyűrű-szélesség és a hőmérséklet között fennálló pozitív összefüggés gyengül, és csökken az évgyűrűk vastagsága (D'Arrigo *et al.* 2004). Egy másik, 230 éves dendrokronológiai adatsort felhasználó vizsgálat szerint a magasabb nyári hőmérséklet és a kevesebb havazás egyaránt pozitívan hatnak a fahatáron tenyésző fák növekedésére (Dolezal *et al.* 2014).

A hazai középhegységi régióban végzett, különféle korú kocsánytalan tölgy (*Quercus petraea* [Matt.] Liebl.) állományok korhadtságát vizsgáló elemzés kimutatta, hogy a szubatlanti térségben fekvő állományok a legegészségesebbek (Trenyik *et al.* 2019). A legnagyobb mértékben leromlott állományok a szárazabb klímájú, kontinentális területeken fordultak elő, ahol a faj korhadtságának átlagos értéke a 60 éves korosztály esetében 4,24% volt (Trenyik *et al.* 2019). Csehországban egy országos léptékű reprezentatív felmérés eredményeként azt tapasztalták, hogy a száradó telepített lucfenyő (*Picea abies* [L.] Karst) állományok 61,2%-a, míg a vizuálisan egészségesnek tűnő egyedek 42,9%-a volt korhasztó hatású

tuskógombával (*Armillaria ostoyae* [Romagnesi] Herink) fertőzött, feltehetőleg a szárazodás és a csökkenő talajvízszint miatt (Holuša *et al.* 2018).

Lucfenyők egészségi állapotának tengerszint feletti magassággal való összefüggését legtöbb esetben dendrokronológiai elemzésekkel vizsgálták. A Magas-Tátra területén egy magassági gradiens (839–1468 m) mentén végzett kutatás azt mutatta ki, hogy az adott évi sugárirányú évgyűrű-vastagodás, valamint az átlagos márciusi, áprilisi, júniusi és júliusi, illetve a megelőző év októberi hőmérséklete között pozitív korreláció figyelhető meg (Savva *et al.* 2006). A magasabb térszíneken tenyésző fák szenzitívebbnek bizonyultak a hőmérséklet-változással szemben. Egy páneurópai elemzés igazolta, hogy a lucfenyő vertikális elterjedésének alsó határát képviselő hegyvidéki elegyes erdőkben az elmúlt 30 évben a faj produktója szignifikánsan, közel negyedével csökkent (Hilmers *et al.* 2019). Szintén európai léptékű modellezéssel mutatták ki, hogy a jövőbeli klimatikus változások következtében feltételezhető a lucfenyő elterjedésének magasabb hegyvidéki régiók felé történő elmozdulása (Falk & Hempelmann 2013). A *P. abies* klimatikus változásokkal szembeni ellenállóképessége elmarad például a közönséges bükkétől és a kocsánytalan tölgyétől, amit a faj melegebb és szárazabb élőhelyeken tapasztalható produktó-csökkenése is jelez (Sáenz-Romero *et al.* 2019).

A Svájci-Alpokban közel 600 faegyed évgyűrűvizsgálata kimutatta, hogy a lucfenyő esetében az évgyűrű-vastagodás és a rövid nyári időszak hőmérséklete között erős, pozitív összefüggés van. Magasabb tengerszint feletti magasságban és hosszabb időskálán modellezve mind a lucfenyő, mind a havasi törpefenyő (*Pinus mugo* Turra) produktója erősebb hőmérsékletfüggést mutatott (Matthias *et al.* 2017). A havasi törpefenyő esetében az eddigi egészségi állapot-vizsgálatok a faj és a légszennyezettség kapcsolatára fókuszáltak, mivel a *P. mugo* kiváló bioindikátornak számít. A havasi törpefenyő pollenmag-abortivitása és a légszennyezettség között pozitív összefüggést figyeltek meg, ami legerősebben a faj vertikális elterjedésének felső határán volt észlelhető (Chropeňová *et al.* 2016). Ez egyben jelzi a fahatáron előforduló egyedek abiotikus stressztényezőknek való fokozott mértékű kitétségét.

Kutatásunk fő célja az volt, hogy meghatározzuk és összehasonlítsuk a *Picea abies* és a *Pinus mugo* – mint domináns erdőalkotó fafajok – egészségi állapotát (korhadtságát és a lucfenyő esetében gombafertőzöttségét) a Keleti-Alpokhoz tartozó Wechsel-hegységben. További cél volt a vizsgált fajok egészségi állapotának értékelése a tengerszint feletti magasság függvényében. Eredményeink alapján következtetni szeretnénk arra, hogy elképzelhető-e, hogy ezeknek a fafajoknak az areája el fog mozdulni felfelé, mivel ennek jelentős ökológiai és természetvédelmi következménye lehet az általuk dominált életközösségek esetében.

Módszerek

Adatgyűjtés

A vizsgálatokat Ausztriában, a Keleti-Alpokhoz tartozó Wechsel-hegységben végeztük 2019-ben, 800 és 1700 méter közötti tengerszint feletti magasságban. A vizsgálati területen a hegyvidéki (montán) övben 800 és 1600 m tengerszint feletti magasság között a lucfenyő, míg a keskenyebb alhavasi (szubalpin) övben 1600 és 1700 m között a havasi törpefenyő dominált, ezért ezeket a fafajokat választottuk ki mérésre.

A vizsgálatra kiválasztott tengerszint feletti magasságok kijelöléséhez 2018-ban elővizsgálatot végeztünk. Ennek során 50 méteres tengerszint feletti magasságonként mértük 3-3 faegyed korhadtságát akusztikus tomográfal mindkét faj esetében. Az elővizsgálat eredményei alapján azokban a magassági régiókban, ahol kiugró volt a korhadtság mértéke, 2019-ben sűrűbb mintavételezést választottunk. Így végül 800–1000 méter között 10 méteres tengerszint feletti magasságonként, 1000–1500 méter között 50 méterenként, 1500–1600 méter között 10 méterenként, míg 1600–1700 méter között 5 méterenként 3-3 faegyedet vizsgáltunk. A közönséges lucfenyőt 800–1600-ig, a havasi törpefenyőt pedig 1600–1700 méterig mértük. A faegyedek kiválasztásánál alapvető szempont volt, hogy minimum 10 méterre legyenek a legközelebbi úttól, valamint törzsmérőjük és lombkoronájuk minél jobban reprezentálja az adott magasságban előforduló faegyedeket.

A fák egészségi állapotát két változóval jellemeztük: a korhadtság és a romlottság (=gombafertőzöttség) mértékével. A korhadtság mérésére akusztikus tomográfot (FAKOPP 3D, Sopron) használtunk, amely képes roncsolásmentesen kimutatni a korhadt vagy üreges régiók méretét és pontos elhelyezkedését (Trenyik *et al.* 2017), valamint ki tudja számítani az egészséges rész arányát a teljes törzskeresztmetszethez képest egy adott talajszint feletti sík esetében. A korhadtságot százalékos arányban adtuk meg, ami komplementere az egészséges rész arányának. A FAKOPP műszer a hang terjedési sebességét méri (akusztikus mérés) a fatörzsön belül (Divós & Divós 2005, Divós *et al.* 2005). A rostokkal párhuzamosan a hang terjedési sebessége elérheti a 4000–5000 m/s-ot, mely 15-ször gyorsabb a levegőben terjedés sebességénél. Ezt a jelentős különbséget használja ki a műszer, valamint azt a tényt, miszerint a hanghullámok terjedési sebessége szoros összefüggésben van a faanyag mechanikai tulajdonságaival. Az akusztikus tomográfós méréseket több vertikális törzsrétegben végeztük el, figyelembe véve a vizsgált fajok eltérő fiziognómiáját. A lucfenyőnél a talajszinttől számítva három magasságban (0,4; 0,8 és 1,2 méteren), míg a havasi törpefenyő esetében két magasságban (0,2 és 0,4 méteren). Mivel a kocsánytalan tölgy esetében történt akusztikus tomográf mérések jelentős eltérést mutattak a törzs különböző rétegei-

nek korhadtsága között (Trenyik *et al.* 2019), ezért láttuk szükségesnek, hogy ezeket a méréseket több rétegben is elvégezzük annak érdekében, hogy a faegyedek korhadtságáról reprezentatívabb mintát kapjunk.

A gombafertőzöttséget impedancia tomográffal (ArborElectro, Sopron) vizsgáltuk, ami roncsolásmentes módon képes kimutatni a törzsön belüli aktív gombafertőzöttség helyét és méretét. A műszer elektródák közötti elektromos ellenállást mér a törzs egy adott szeletén (mértékegysége: Ohm m⁻¹). Az elektromos ellenállás függ a két elektróda közötti terület ion-koncentrációjától, amit pedig a gomba jelenléte vagy hiánya határoz meg. Ezzel a módszerrel a gombafertőzések már igen korai fázisban meghatározhatóak és kimutathatóak (Divós *et al.* 2007). A gombafertőzöttség impedancia tomográffal történő méréséhez minimum 15 cm vastag törzsátmérőjű szükséges. A havasi törpefenyő esetében a vizsgálati területen előforduló fák törzsátmérője ennél kisebb volt, ezért ennél a fajnál az ArborElectro műszeres méréseket nem tudtuk elvégezni.

Statisztikai elemzések

Lineáris regresszióval (*Linear Regression Analysis*) vizsgáltuk a fa korhadtsága, ill. romlottsága és a tengerszint feletti magasság közötti összefüggést (Faraway 2005). A regressziós kapcsolatban a korhadtságot, illetve romlottságot függő változóként (*response variable*), míg a tengerszint feletti magasságot mint magyarázó változót (*explanatory variable*) használtuk. Vizsgáltuk a faegyedek hatását is, mint random faktor, de mivel nem volt érdemi hatása, ezért elhagyhatónak bizonyult és az egyszerűsítés kedvéért kikerült a modellből.

Az összes modell esetében a regressziós egyenes illesztése a legkisebb négyzetek (*method of ordinary least squares – OLS*) módszere szerint történt. A determinációs együtthatót (*Coefficient of Determination – R²*) használtuk fel annak megállapítására, hogy a függő változó varianciájának mekkora részét magyarázza meg a független változóval mérhető kapcsolata. A grafikus ábrázolás során lokális regressziót (*Locally Weighted Linear Regression – LOESS*) használtunk és 95%-os konfidencia intervallummal ábrázoltuk a regressziós görbét (Jacoby 2000).

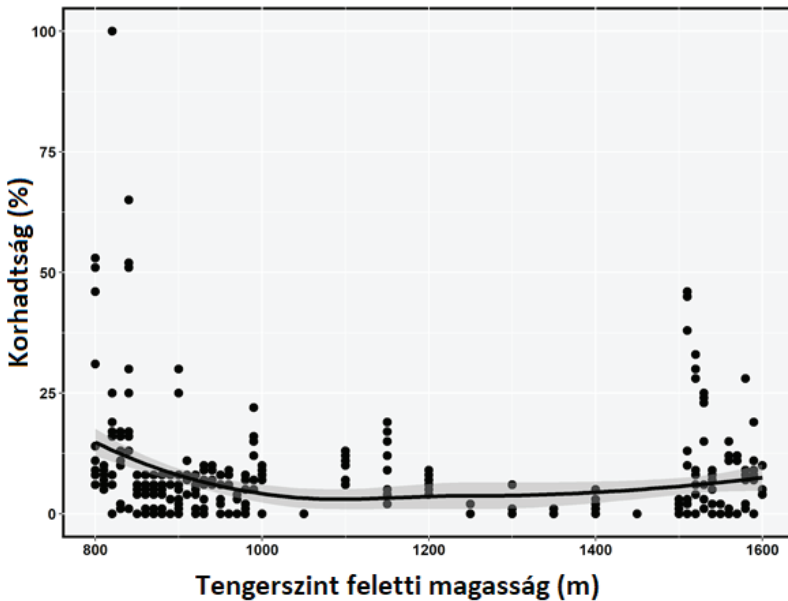
Az összes statisztikai modell esetében elvégeztük az adott próbára vonatkozó feltételeket. A normalitás vizsgálatához a Kolmogorov-Szmirnov és a Shapiro-Wilk próbát használtuk fel, a szórás-homogenitás tesztelése pedig a Bartlett-próba és a Levene-próba segítségével történt, mindkét esetben ugyancsak 5%-os megbízhatósági szinten.

A statisztikai elemzéseket az R program 3.6.3 verziójával végeztük (R Core Team 2020). Ezekhez az elemzésekhez a „nortest” (Gross & Ligges 2015) és „car” (Fox & Weisberg 2019), míg a grafikus ábrázolásokhoz a „ggplot2” (Wickham 2016) kiegészítő csomagokat használtuk fel.

Eredmények

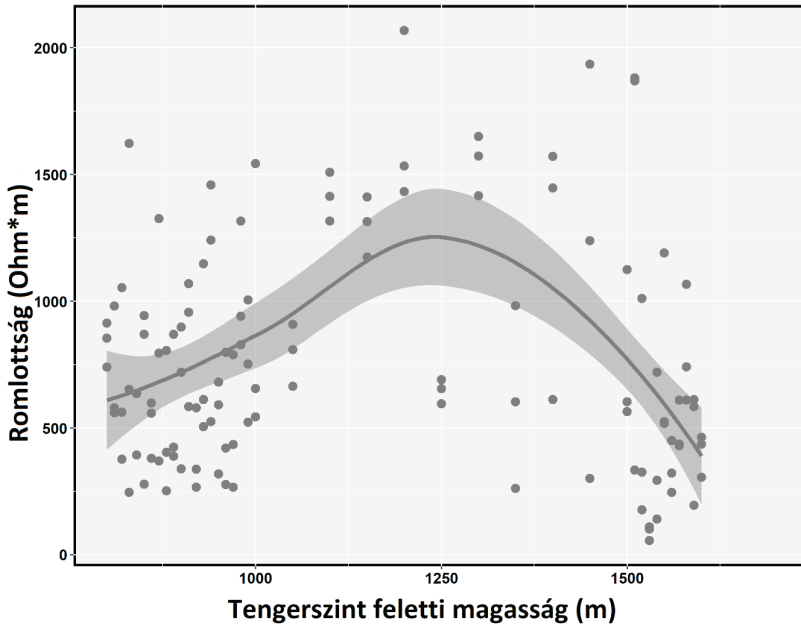
Közönséges lucfenyő

A lucfenyő korhadtsága és a tengerszint feletti magasság közötti kapcsolatot regresziós analízissel vizsgálva gyenge szignifikanciát mutatott ($F_{1,367}=5,12$; $p=0,02$), illetve a korrelációs együttható értéke nagyon kicsinek bizonyult ($R^2=0,01$), ami arra utal, hogy klasszikus görbével nem írható le ez a kapcsolat. A lokális regreszió alapján (1. ábra) nem volt egyértelmű összefüggés a lucfenyő korhadtsága és a tengerszint feletti magasság között. Mindazonáltal az 1. ábrából látható, hogy 800 és 1000 m, illetve 1500 és 1600 m tengerszint feletti magasság között a korhadtsági százalék magasabb volt, mint 1000 és 1500 m közötti tengerszint feletti magasság esetében. A legnagyobb mértékű romlottságot a *Picea abies* esetében 840 méteren mértük, átlagosan 30%-os (95% CI: 24,36; 35,64; $n=9$) értékkel. 1500 métertől felfelé haladva a fafaj felső elterjedési határáig fokozatosan nőtt a korhadtság mértéke, ahogy azt a konfidencia-intervallum is jelzi, de ebben a magassági zónában kisebb mértékű volt a fák károsodása, mint az alacsonyabb térszíneken.



1. ábra: A lucfenyő (*P. abies*) korhadtságának mértéke a vizsgált tengerszint feletti magassági gradiens mentén (Wechsel-hegység, montán öv). A fekete pontok a vizsgált faegyedek ($n=123$) mért törzsréteg-pontjainak korhadtsági értékét jelzik (3 pont/faegyed, $n=369$).

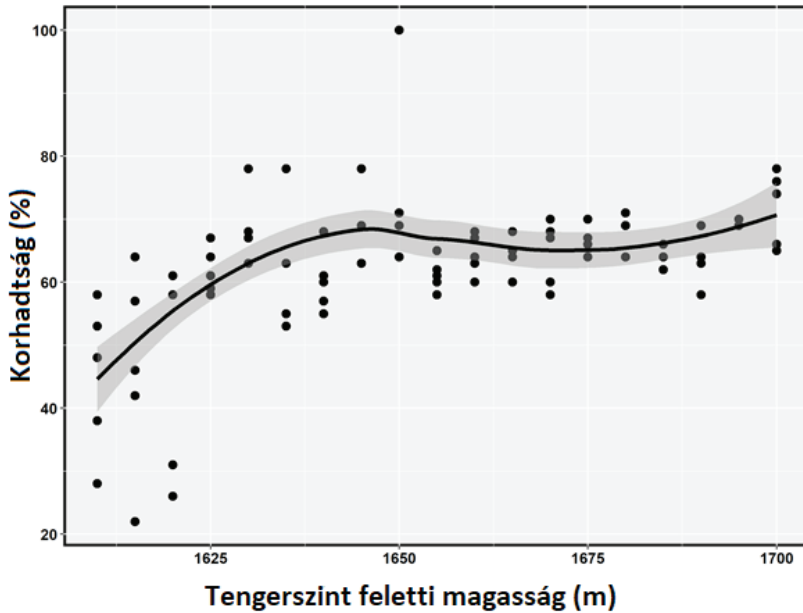
A romlottsági értékekre illesztett trendvonal a korhadtságtól eltérő, haranggörbe jellegű lefutást mutatott (2. ábra). A romlottság értékeinek szórása 800 és 1000, illetve 1500 és 1550 m között volt a legmagasabb, míg a legkisebb szórásértékek 1250, illetve 1600 m körül voltak megfigyelhetők.



2. ábra: A lucfenyő (*P. abies*) gomba-fertőzőttségének mértéke a vizsgált magassági gradiens mentén (Wechsel-hegység, montán öv). A fekete pontok a vizsgált faegyedek ($n=123$) mért törzsréteg-pontjainak romlottsági értékét jelzik (3 pont/faegyed, $n=369$).

Havasi törpefenyő

A *Pinus mugo* esetében a regressziós analízis szignifikáns kapcsolatot mutatott (3. ábra, $F_{1,112}=25,35$; $p<0,001$) a tengerszint feletti magasság és a korhadtság között, a determinációs együttható értéke is magasabb volt, mint a lucfenyő esetében ($R^2=0,18$). A lokális regresszió alapján megállapítható, hogy a korhadtság mértéke nőtt a magasabb térszín felé haladva (3. ábra). A korhadtság mértéke a faj elterjedésének alsó határán, 1610 és 1640 m között emelkedett jelentősebb mértékben. Ennél nagyobb tengerszint feletti magasságban a mért értékek közel azonos tartományban voltak, egészen a törpefenyő elterjedésének legfelső határáig. A fahatár közelében újra emelkedett a korhadtság mértéke. A *Pinus mugo* esetében 1700 m magasságban mértük a legnagyobb mértékű átlagos korhadtságot, átlagosan 72,2%-ot (95% CI: 65,4; 78,9; $n=6$), míg a legalacsonyabb korhadtsági értéket a elterjedési terület legalsó részén detektáltuk: 1610 m tengerszint feletti magasság-



3. ábra: A havasi törpefenyő (*P. mugo*) korhadtságának mértéke a vizsgált magassági gradiens mentén (Wechsel-hegység, szubalpin öv). A fekete pontok a vizsgált faegyedek ($n=57$) mért törzsréteg pontjainak korhadtsági értékét jelzik (2 pont/faegyed, $n=114$). Az illesztett görbe polinomiális ($\pm 95\%$ konfidencia intervallum).

ban átlagosan 41,7% volt (95% CI: 40,4; 53,9; $n=6$). A havasi törpefenyő elterjedésének alsó határán mért korhadtsági értékek – az 1615 és 1620 m magasan mért értékek kivételével – szignifikánsan alacsonyabbak voltak a többi szinthez képest ($p<0,001$; 1625, 1640 és 1655 méterrel összevetve).

Értékelés

A korhadtsági eredmények azt mutatják, hogy a *Picea abies* egyedek egészségi állapota a faj alsó magassági elterjedési határán a legrosszabb, amit a gombaferőtözöttség magas szórásértéke is alátámaszt. Ez egyezik Hilmers és munkatársai (2019) lucfenyőre vonatkozó megfigyelésével. A korhadtsági mérések alapján úgy tűnik, hogy a lucfenyő a jelenlegi klimatikus viszonyok között 1050 és 1450 méter közötti tengerszint feletti magasságban van a legjobb egészségi állapotban, amely magassági tartomány egyben a faj elterjedési optimumának is tekinthető a vizsgált hegységben. Ebben a tartományban a *Picea abies* korhadtságának értékei

hasznalóak voltak, mint a Kárpát-medencében a különböző korú *Quercus petraea* állományok adatai (Trenyik *et al.* 2017, 2019). A lucfenyő alsó elterjedési határán megfigyelt szignifikánsan magasabb korhadtsági értékek és a romlottság jelentős szórása azt jelzi, hogy a faj elterjedési területének alsó régiója kevésbé kedvező a faj számára, így elképzelhető, hogy az alsó előfordulási határa el fog mozdulni felfelé. A gombafertőzöttség mértékének csökkenő trendje a *P. abies* felső magassági elterjedési határa felé pedig előrejelezhetné azt a lehetőséget, hogy a faj képes lehetne felfelé kiterjeszteni vertikális areáját. Vizsgálatunk alapján úgy tűnik, hogy gombafertőzöttség szempontjából ugyan kedvezőbb lehetne a lucfenyőnek magasabb térszínek felé tolni, azonban a fafaj elterjedésének felső magassági határa közelében – feltehetően a növekvő mértékű stressz miatt – jobban korhad. Utóbbi gátat szabhat a lucfenyő felfelé történő elmozdulásának, így az alsó elterjedési határ felfelé történő elmozdulásával akár egy area-szűkülés is előfordulhat a *Picea abies* esetében. Utóbbi természetvédelmi szempontból kedvezőtlen lenne, hiszen az általa dominált élőhely beszűkülésével járna együtt. Ehhez az area-szűküléshez feltehetően a lucosokhoz köthető fajoknak csak egy része tudna alkalmazkodni, ami hosszabb távon az élőhely fajdiverzitásának csökkenéséhez vezethet, a havasi gyepek kiterjedésének csökkenésekor tapasztaltakhoz hasonlóan (Baker & Moseley 2007, Cazzolla Gatti *et al.* 2019).

A *Pinus mugo* esetében a korhadtság mértéke nőtt a magasabb térszínek felé haladva, a két változó között pozitív szignifikáns összefüggés mutatható ki. A havasi törpefenyő esetén a faj alsó elterjedési határán mért alacsonyabb, míg a felső elterjedési övben mért magasabb korhadtsági értékek azt jelzik, hogy a faj vertikális areájának változása, felfelé történő elmozdulása – a lucfenyővel ellentétben – a közeljövőben nem valószínűsíthető a vizsgált területen. A havasi törpefenyő lucfenyőhöz képest jelentősen magasabb korhadtsági értékei a magasabb régióra jellemző nagyobb mértékű abiotikus stresszel magyarázhatóak.

Eredményeink részben összhangban állnak Lenoir *et al.* (2008), Liang *et al.* (2016) és Jump *et al.* (2009) terepi megfigyeléseken alapuló megállapításával, valamint Vittoz *et al.* (2013), Falk & Hempelmann (2013) és Bussotti *et al.* (2015) modellezési eredményeivel, azaz a jelenleg zajló éghajlatváltozás megváltoztathatja a fafajok elterjedését, illetve a hőmérséklet növekedése a hegyvidéki fajok areájának gyors ütemű felfelé történő elmozdulását idézheti elő. A *Picea abies* és a *Pinus mugo* elterjedésének felső határán tapasztalt magasabb korhadtsági értékek azt is jelezhetik, hogy amennyiben a fafajok areája felfelé tolódik, az növekvő mértékű hidegstressznek, szélsőségesebb időjárási eseményeknek (pl. erősebb és gyakoribb szélviharok, jégtörés) teszi ki őket, és ezáltal csökkenő fitnessszel járhat.

A hegyvidéki növényzeti övek potenciális eltolódása, az élőhelyek átalakulása természetvédelmi szempontból nem biztos, hogy kedvező, mert valószínűsíthető, hogy nem minden faj képes az állományalkotó fafajjal együtt vándorolni.

Irodalomjegyzék

- Baker, B. B. & Moseley, R. K. (2007): Advancing treeline and retreating glaciers: implications for conservation in Yunnan, PR China. – *Arctic, Antarctic, and Alpine Research* **39**: 200–209. <https://doi.org/10.1657/1523-0430>
- Bussotti, F., Pollastrini, M., Holland, V. & Brüggemann, W. (2015): Functional traits and adaptive capacity of European forests to climate change. – *Environ. Exp. Bot.* **111**: 91–113. <https://doi.org/10.1016/j.envexpbot.2014.11.006>
- Cazzolla Gatti, R., Callaghan, T., Velichevskaya, A., Dudko, A., Fabbio, L., Battipaglia, G. & Liang, J. (2019): Accelerating upward treeline shift in the Altai Mountains under last-century climate change. – *Sci. Rep.* **9**: 7678. <https://doi.org/10.1038/s41598-019-44188-1>
- Chropeňová, M., Gregušková, E. K., Karásková, P., Příbylová, P., Kukučka, P., Baráková, D. & Čupr, P. (2016): Pine needles and pollen grains of *Pinus mugo* Turra – A biomonitoring tool in high mountain habitats identifying environmental contamination. – *Ecol Indic.* **66**: 132–142. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2016.01.004>
- D'Arrigo, R. D., Kaufmann, R. K., Davi, N., Jacoby, G. C., Laskowski, C., Myneni, R. B. & Cherubini, P. (2004): Thresholds for warming-induced growth decline at elevational tree line in the Yukon Territory, Canada. – *Global Biogeochem Cy.* **18**: GB3021. <https://doi.org/10.1029/2004gb002249>
- Defila, C. & Clot, B. (2005): Phytophenological trends in the Swiss Alps, 1951–2002. – *Meteorol Z.* **14**: 191–196. <https://doi.org/10.1127/0941-2948/2005/0021>
- Divós, F. & Divós, P. (2005): Resolution of stress wave based Acoustic Tomography. – In: Bröker, W. (ed.): *Proceedings of the 14th International Symposium on Nondestructive Testing of Wood*. Eberswalde, pp. 309–314.
- Divós, F., Dénes, L. & Iniguez, G. (2005): Effect of crosssectional change of a board specimen on stress wave velocity determination. – *Holzforschung* **59**: 230–231. <https://doi.org/10.1515/HF.2005.036>
- Divós, F., Divós, P. & Divós, Gy. (2007): Acoustic Technique use from seedling to wooden structures. – In: Brashaw, B. (ed.): *Proceedings of the 15th International Symposium on Nondestructive Testing of Wood*. Duluth, pp. 230–231.
- Dolezal, J., Altman, J., Vetrova, V. P. & Hara, T. (2014): Linking two centuries of tree growth and glacier dynamics with climate changes in Kamchatka. – *Clim Chang.* **124**: 207–220. <https://doi.org/10.1007/s10584-014-1093-4>
- Falk, W. & Hempelmann, N. (2013): Species Favourability Shift in Europe due to Climate Change: A Case Study for *Fagus sylvatica* L. and *Picea abies* (L.) Karst. Based on an Ensemble of Climate Models. – *Int. J. Climatol.* ID 787250. <https://doi.org/10.1155/2013/787250>
- Faraway, J. J. (2005): *Linear Models with R*. – Boca Raton, Florida, 229 p.
- Fox, J. & Weisberg, S. (2019): *An {R} Companion to Applied Regression*. – Third Edition. Thousand Oaks CA: Sage. <https://socialsciences.mcmaster.ca/jfox/Books/Companion/>
- Gross, J. & Ligges, U. (2015): *Nortest: Tests for Normality*. – R package version 1.0-4. <http://CRAN.R-project.org/package=nortest>
- Hilmers, T., Avdagić, A., Bartkovicz, L., et al. (2019): The productivity of mixed mountain forests comprised of *Fagus sylvatica*, *Picea abies*, and *Abies alba* across Europe. – *Int. J. For. Res.* **92**: 512–522. <https://doi.org/10.1093/forestry/cpz035>
- Holuša, J., Lubojacký, J., Čurn, V., Tonka, T., Lukášová, K. & Horák, J. (2018): Combined effects of drought stress and Armillaria infection on tree mortality in Norway spruce plantations. – *Forest Ecol. Manag.* **427**: 434–445.
- IPCC (2007): *Fourth Assessment Report of Intergovernmental Panel on Climate Change*. <http://www.ipcc.ch>

- Jacoby, W. G. (2000): Loess: a nonparametric, graphical tool for depicting relationships between variables. – *Elect. Stud.* **19**: 577–613. [https://doi.org/10.1016/S0261-3794\(99\)00028-1](https://doi.org/10.1016/S0261-3794(99)00028-1)
- Jump, A. S., Mátyás, Cs. & Peñuelas, J. (2009): The altitude-for-latitude disparity in the range retractions of woody species. – *Trends Ecol. Evol.* **24**: 694–701. <https://doi.org/10.1016/j.tree.2009.06.007>
- Lenoir, J., Gegout, J. C., Marquet, P. A., de Ruffray, P. & Brisse, H. (2008): A significant upward shift in plant species optimum elevation during the 20th century. – *Science* **320**: 1768–1771. <https://doi.org/10.1126/science.1156831>
- Liang, E., Wang, Y., Piao, S., Lu, X., Camarero, J. J., Zhu, H., Zhu, L., Ellison, A. M., Ciais, P. & Peñuelas, J. (2016): Species interactions slow warming-induced upward shifts of treelines on the Tibetan Plateau. – *Proceedings of the National Academy of Sciences*. **113**: 4380–4385. <https://doi.org/10.1073/pnas.1520582113>
- Máliš, F., Kopecký, M., Petřík, P., Vladovič, J., Merganič, J. & Vida, T. (2016): Life stage, not climate change, explains observed tree range shifts. – *Glob. Change Biol.* **22**: 1904–1914. <https://doi.org/10.1111/gcb.13210>
- Matthias, J., Bugmann, H., Nötzli, M. & Bigler, C. (2017). Among-tree variability and feedback effects result in different growth responses to climate change at the upper treeline in the Swiss Alps. – *Ecol. Evol.* **7**: 7937–7953. <https://doi.org/10.1002/ece3.3290>
- Mátyás, Cs. & Kramer, K. (2016): Az erdei génkészletek szerepe a klímaváltozáshoz alkalmazkodó gazdálkodásban = Adaptive management of forests and their genetic resources in the face of climate change. – *Erdészettudományi Közlem.* **6**: 7–16.
- Nogués-Bravo, D., Araújo, M. B., Errea, M. P. & Martínez-Rica, J. P. (2007): Exposure of global mountain systems to climate warming during the 21st Century. – *Global Environ. Chang.* **17**: 420–428. <https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2006.11.007>
- OcCC (2008): *Le climat change - que faire?* – Le nouveau rapport des Nations Unies sur le climat (GIEC 2007) et ses principaux résultats dans l'optique de la Suisse. Berne: OcCC. <http://www.proclim.ch>
- Pepin, N., Bradley, R. & Diaz, H. (2015): Elevation-dependent warming in mountain regions of the world. – *Nature Clim. Change.* **5**: 424–430. <https://doi.org/10.1038/nclimate2563>
- R Core Team (2020): *R: A language and environment for statistical computing*. – R Foundation for Statistical Computing, Vienna. <http://www.R-project.org/>
- Savva, Y., Oleksyn, J., Reich, P. B., Tjoelker, M. G., Vaganov, E. A. & Modrzynski, J. (2006): Interannual growth response of Norway spruce to climate along an altitudinal gradient in the Tatra Mountains, Poland. – *Trees – Struct. Funct.* **20**: 735–746. <https://doi.org/10.1007/s00468-006-0088-9>
- Sáenz-Romero, C., Kremer, A., Nagy, L., Újvári-Jármay, É., Ducouso, A., Kóczán-Horváth, A., Hansen, J. K. & Mátyás, Cs. (2019): Common garden comparisons confirm inherited differences in sensitivity to climate change between forest tree species. – *PeerJ* **7**: e6213. <https://doi.org/10.7717/peerj.6213>
- Trenyik, P., Ficsor, Cs., Demeter, A., Falvai, D. & Czóbel, Sz. (2017): Examination the health state with instrumental measurements and the diversity of sessile oak stands in Zemplén mountains. – *Columella* **4**: 21–30. <https://doi.org/10.18380/SZIE.COLUM.2017.4.1.21>
- Trenyik, P., Skutai, J., Szirmai, O. & Czóbel, Sz. (2019): Instrumental analysis of health status of *Quercus petraea* stands in the Carpathian Basin. – *Central European Forestry Journal* **65**: 34–40. <https://doi.org/10.2478/forj-2019-0001>
- Vittoz, P., Cherix, D., Gonseth, Y., Lubini, V., Maggini, R., Zbinden, N. & Zumbach, S. (2013): Climate change impacts on biodiversity in Switzerland: A review. – *J. Nat. Conserv.* **21**: 154–162. <https://doi.org/10.1016/j.jnc.2012.12.002>

- Wickham, H. (2016): *ggplot2: Elegant graphics for data analysis*. – Springer-Verlag, New York.
- Wipf, S., Stöckli, V., Herz, K. & Rixen, C. (2013): The oldest monitoring site of the Alps revisited: accelerated increase in plant species richness on Piz Linard summit since 1835. – *Plant Ecol. Divers.* **6**: 447–455. <https://doi.org/10.1080/17550874.2013.764943>

Investigation of the health status of *Picea abies* and *Pinus mugo* tree species in the semi-natural forest stands of the Wechsel Mountains

Dominika Falvai¹, Tivadar Baltazár², Zsófia Szegleti¹
& Szilárd Czóbel^{1,*}

¹*Szent István University, Department of Nature Conservation and Landscape Management, H-2100 Gödöllő, Páter Károly u. 1., Hungary*

²*Mendel University in Brno, Faculty of AgriSciences, Department of Agrochemistry, Soil Science, Microbiology and Plant Nutrition, 613 00 Brno, Zemědělská 1/1665, Czech Republic*

E-mail: Czobel.Szilard@szie.hu

Several climatic models predict a significant rise in temperature in mountainous regions, which, alongside other factors, may influence the distribution of montane species and the composition of local communities. Observed or predicted thermophilization in mountainous areas may accelerate the upward movement of forest-forming tree species in the Alps. In our research, we studied the changes of the health status of dominant coniferous species in the montane and subalpine zones of the Wechsel Mountains, along an elevation transect. Field measurements were performed using an ArborSonic FAKOPP 3D acoustic tomograph and an ArborElectro impedance tomograph, which are able to detect the extent and exact location of rotten parts, as well as the extent and location of fungal infestation, without destruction. For both *Picea abies* and *Pinus mugo*, we found significant but partly different correlations between the degree of rot and the altitude. In the spruce belt, the trend line fitted to the fungal infestation values was bell-shaped. Spruce proved to be significantly more rotten in the lower elevation area of its distribution. Consequently, a narrowing of the area of the spruce zone is likely to take place in the study area. From a conservational aspect, this is not favourable, as *Picea abies* is a dominant, stand-forming tree species, therefore the narrowing of the complete spruce habitat may have negative consequences for several species associated with the habitat, especially for those characterized by a lower ecological adaptability.

Keywords: Norway spruce, dwarf mountain pine, altitudinal transect, decay, fungal infestation