

A bükk és a bükkösök Magyarországon

Az MTA Erdészeti Tudományos Bizottságának
tanulmánykötete IV.



2024

Az MTA Erdészeti Tudományos Bizottságának
tanulmánykötete IV.

A bükk és a bükkösök Magyarországon

Majer Antal (1920–1995) egyetemi tanár,
a bükkösök jeles kutatója emlékének

Az MTA Erdészeti Tudományos Bizottságának
tanulmánykötete IV.

A bükk és a bükkösök Magyarországon

Szerkesztette:

BARTHA DÉNES, CSÓKA GYÖRGY és MÁTYÁS CSABA



SOPRONI EGYETEM KIADÓ
Sopron, 2024

A kiadvány a Magyar Tudományos Akadémia Agrártudományok Osztálya
Erdészeti Tudományos Bizottságának kezdeményezésére jött létre.



Jelen publikáció a „TKP2021-NKTA-43 azonosítószámú ErdőLab” projekt keretében az Innovációs és Technológiai Minisztérium (jogutód: Kulturális és Innovációs Minisztérium) Nemzeti Kutatási Fejlesztési és Innovációs Alapból nyújtott támogatásával, a TKP2021-NKTA pályázati program finanszírozásában valósult meg.

Kiadó:
Soproni Egyetem Kiadó

Felelős kiadó:
Prof. Dr. Fábíán Attila, a Soproni Egyetem rektora



Creative Commons license: CC BY-NC-SA 4.0 DEED



Nevezd meg! - Ne add el! - Így add tovább! 4.0 Nemzetközi
Attribution-NonCommercial-ShareAlike 4.0 International

Borítókép: Frank Tamás
Borítóterv: Gáspár Csaba

ISBN 978-963-334-527-6 (nyomtatott)
ISBN 978-963-334-528-3 (pdf)

A kötet DOI száma: <https://doi.org/10.35511/978-963-334-528-3>

Nyomdai kivitelezés:



INFORM
Kiadó & Nyomda
1149 Budapest, Angol u. 34.
www.informstudio.hu

Budapest, 2024/29

TARTALOM

Előszó	7
A bükkösök és az ErdőLab-projekt	8
1. A bükk bemutatása	9
1.1. A bükk (<i>Fagus</i>) nemzetség és fajai rövid ismertetése	11
1.2. A közönséges bükk (<i>Fagus sylvatica</i>) taxonómiája és biológiája	25
1.3. A bükk és a bükkösök ökológiai sajátosságai	59
1.4. A bükk genetikai változatossága, szaporodásbiológiája	104
1.5. A bükk kémiai sajátosságai	124
2. A bükk a Kárpát-medencében	141
2.1. A bükk posztglaciális elterjedéstörténete	142
2.2. A bükk és a bükkösök aktuális elterjedési területe	147
2.3. A bükk hazai előfordulása, erdészeti statisztikai adatai	151
2.4. Különleges bükk előfordulások Magyarországon	161
3. A bükkös ökoszisztéma és növényközösségei	165
3.1. A bükkösök termőhelyi viszonyai	166
3.2. Bükkös erdőtársulások, bükkös élőhelytípusok	180
4. A bükk és a bükkösök gombái, gombaközösségei	213
4.1. A bükkösök nagygombáinak funkcionális csoportjai	214
4.2. A bükkösök nagygombái mint indikátorok	223
4.3. A klímaváltozás hatása a bükkösökre és a fungájukra	230
5. A bükkösök állatvilága	231
5.1. A bükkösök gerinces állatai	232
5.2. A bükk és a bükkösök ízeltlábú faunája	247
5.3. A bükkösök csigái	266
6. A bükk helye a hazai erdőgazdálkodásban – régen és most	269
6.1. A bükk növekedési tulajdonságai, a bükkösök fatermése	270
6.2. A gazdálkodás hatása a bükkösökre	283
6.3. A bükkösök erdőművelési módszerei	291
6.4. Erdőhasználati módszerek és lehetőségek bükkösökben	312
6.5. A bükkgazdálkodás gyakorlati vonatkozásai	320
6.6. A bükkösök ökonómiai értékelése	333
6.7. A bükk faanyaga és annak felhasználása	340

7. A bükkösök erdővédelmi kérdései	367
7.1. Abiotikus kalamitások/bolygatások	368
7.2. Biotikus tényezők	375
7.3. Közvetlen antropogén károk bükkösökben	397
8. A bükkösök természetvédelmi és közjóléti szerepe, ökológiai szolgáltatásai	399
8.1. A hazai bükkösök természetességi állapota	340
8.2. Bükkös erdőrezervátumok Magyarországon	412
8.3. A hazai bükkösök természetessége és a természetvédelmi oltalom összefüggései	424
8.4. Az erdei biodiverzitás-megőrzés gyakorlati lehetőségei kezelt bükkösökben	434
8.5. A hazai bükkösök közjóléti, társadalmi és ökológiai szolgáltatási szerepe	451
8.6. Kultúrtörténeti vonatkozások	458
9. Bükkösök a változó klímában	477
9.1. Klimatikus változások kihívásai és a bükk	478
9.2. A bükk fenotípusos és genetikai alkalmazkodása a környezeti feltételekhez	480
9.3. A bükk klímaterének és vitalitásának előrevetítése a 21. századra	487
10. Zárszó	499
10.1. Mit tudhatunk?	500
10.2. Mit tehetünk?	501
10.3. Mit remélhetünk?	502
A kötet szerzői és lektorai	505

1.5. A bükk kémiai sajátosságai

Fatest, kéreg, levél: kémiai komponensek és paraméterek

Hofmann Tamás

A bükk kémiai összetételének tárgyalásánál megkülönböztetünk elemi összetételt, valamint molekuláris összetételt. Az elemi összetétel az ásványianyag-tartalomról ad információt. A bükk szíjács, álgeszt, kéreg és a levélzet fontosabb elemi összetevőit az 1.5.-1. táblázat tartalmazza.

1.5.-1. táblázat. A szíjács, álgeszt, kéreg és a levél fontosabb ásványianyag-összetevői száraz faanyagra vonatkoztatva (n/a = nincs adat)

	N mg/g	P mg/g	S mg/g	Ca mg/g	K mg/g	Mg mg/g	Fe mg/kg	Mn mg/kg	Zn mg/kg	Cu mg/kg	Mo mg/kg	Al mg/kg
Szíjács	1,0	0,1	0,6	1,4	0,6	0,6	26,1	62,4	4,6	1,2	5,1	26,2
Álgeszt	0,9	0,1	0,6	1,7	0,7	0,6	35,6	56,5	4,9	1,3	4,7	27,6
Kéreg	6,1	0,4	0,8	21,5	3,9	0,7	181,0	1030	8,8	3,2	n/a	8,9
Levél	19,9	1,1	1,4	10,3	7,9	1,2	90,1	380,1	27,5	7,1	n/a	78,7

Más fafajokhoz hasonlóan az ásványi anyagok mennyisége a levél>kéreg>faanyag irányban csökken. A makroelemek (N, P, S, Ca, K) fehérjék és biomolekulák építőkövei, a mikroelemek (Fe, Mn, Zn stb.) enzimek kofaktorai, élettani folyamatokban játszanak szerepet. Az elemtartalom jelentősen változhat az életkortól, egészségi állapottól, a termőhelytől és a környezeti hatásoktól függően. Elsősorban a különböző levélminták (Salehi et al. 2020) és kéregminták (Long et al. 2023) elemtartalmában mérhetőek jelentős ingadozások. A nehézfémekről (Hg, Cd, Pb stb.) a táblázat nem tartalmaz adatokat, mivel ezek elsősorban antropogén forrásból származnak mennyiségük nem a fajra jellemző érték. A szíjács és az álgeszt elemi összetétele között szignifikáns különbség van, az álgeszt magasabb Ca- és alacsonyabb P-tartalmú (Albert et al. 1998a). A bükkösök dendromasszájának tápelem-tartalma részleteivel az 1.3. fejezet »Tápelem-készlet és -forgalom« alfejezete foglalkozik.

A molekuláris összetétel az egyes szövetek, morfológiai egységek (szíjács, álgeszt, kéreg, levél stb.) makroszerkezetével, valamint biológiai, erdészeti és faipari vonatkozásaival van összefüggésben. Szeretlen és szerves vegyületek alkotják. A szeretlen részt hamuanyagok formájában határozzák meg, a szervesanyag rész szerkezeti (cellulóz, hemicellulóz, lignin) és extraktanyagokat tartalmaz. Az extrakt- vagy járulékos anyagok mennyisége lényegesen kisebb, mint a szerkezeti anyagoké. Fontosságukat bizonyítja, hogy részt vesznek élettani és anyagcsere folyamatokban, meghatározzák a színt, az illatot és a kémhatást, befolyásolják a stressz toleranciát és a faanyag számos technológiai tulajdonságát, mint tartósság, ragaszthatóság. Mérgező vagy jótékony élettani hatásokkal rendelkezhetnek. Az 1.5.-2. táblázat összegzi a bükk fatest egyes szöveteinek kémiai felépítését és pH-ját.

1.5.-2. táblázat. A bükk fatest főbb kémiai jellemzői száraz faanyagra vonatkoztatva (n/a = nincs adat)

	Cellulóz (%)	Hemicellulóz (%)	Klason lignin (%)	Összes extrakt (%)	Hamu (%)	pH
Szíjács	43–50	29–32	17–23	1–3	0,2–0,5	5,2–5,5
Álgeszt	41–43	30–34	19–22	1–2	0,2–0,5	5,8–6,0
Juvenilis fa	43	24	29	3–4	n/a	n/a
Kéreg	26–30	26–31	24–40	5–15	3–7	n/a
Levél	25–29	5–15	17–20	20–30	5–15	n/a

A szijács szerkezeti anyagainak összetétele más lombosfákéhoz viszonyítva átlagos (Molnár 2004): 43–50% cellulózt, 17–23% lignint, 29–32% hemicellulózt tartalmaz (Bodirlau et al. 2008). A hemicellulóz frakció elsősorban glükuron-xilánokból, kisebb részben glükomannánokból épül fel. A bükk hemicellulózok acetyl-csoport tartalma igen magas, a cukoregységek 50–70%-a acetilezett, ez a faanyag gőzölésénél (Nemeth et al. 2016) és termikus modifikációjánál jelentős ecetsav felszabadulást eredményez (Hofmann et al. 2013). A juvenilis fában a lignin tartalom lényegesen nagyobb (29%), a szerkezeti szénhidrát-tartalom kisebb, mint a szijácsban (Akgül & Tozluoglu 2009). A kéreg cellulóz tartalma kisebb, lignin tartalma nagyobb, mint a szijácsé, a hemicellulóz tartalma hasonló (Özgenç et al. 2017; Brózdowski et al. 2018). A levélben elsősorban az extraktanyagok és a hamuanyagok dominálnak, a szerkezeti polimerek mennyisége kisebb, mint a fatest többi szövetéi (Sariyildiz & Anderson 2005). Az álgeszt a szijácshoz hasonló, vagy annál 1–2%-kal nagyobb lignin- és hemicellulóz- és 1%-kal kisebb cellulóz tartalommal rendelkezik (Dzurenda et al. 2023).

A bükk szövetek kémiai sajátágaiban a legjellegzetesebb különbség a hamu- és az összes extraktanyag mennyiségében és összetételében van. A legmagasabb hamutartalom a levélben mérhető. A bükk kéreg hamutartalma kisebb, mint a levélé, de más fajok kérgéhez képest kiemelkedően magas (Kamperidou et al. 2018). A fatest többi részének alacsony a hamutartalma. Az álgeszt magasabb pH-val és alacsonyabb savtartalommal jellemezhető, mint a nem álgesztes faanyag.

Az összes extraktanyag tartalom a vízben- és a szerves oldószerek sorozatában (ciklohexán, dietil-éter, metil-alkohol) oldható járulékos anyagok mennyiségének összessége. A legfontosabb vízoldható extraktanyagok a polifenolok, cukrok, karbonsavak és alkoholok, a nem-vízoldható anyagok közé tartoznak a szterolszármazékok, zsírok, viaszok és illékony terpénszármazékok. A bükk szijács extraktanyag tartalma más fákhoz képest alacsony (Nemeth 1997; Molnár 2004). Az extraktanyagok nagyobb része vízoldható típusú, ezek közül a legjelentősebbek a cukrok, a cukoralkoholok, a cukorsavak és a polifenolok (Vek et al. 2016; Hofmann et al. 2015a, b). Nem-vízoldható a telített- és telítetlen zsírsav, a zsíralkohol és a szterol tartalom. Hasonlóan a tűlevelű fajokhoz, a bükk juvenilis faanyagának összes extraktanyag tartalma mintegy 2-3%-kal magasabb, mint az érettfáé (Akgül & Tozluoglu 2009), ami a korai növekedés eltérő biokémia folyamataival magyarázható. A kéreg extraktanyag tartalma kiemelkedően magas, elsősorban polifenolos vegyületek alkotják, melyek a védekezésben vesznek részt (Hofmann et al. 2015b). A levelek extraktanyag profilja rendkívül összetett: jelentős mennyiségben tartalmaz polifenolokat, cukrokat, illékony szerves vegyületeket (Cadahía et al. 2015; Hofmann et al. 2017a), ezek minősége és mennyisége szezonálisan is jelentősen változik (Tálos-Nebehaj et al. 2017) az aktuális élettani folyamatoknak megfelelően. Az álgeszt összes extraktanyag tartalma kisebb, mint a szijácsé, de a szijácsnál nagyobb mennyiségben tartalmaz telített zsírsavakat, zsíralkoholokat, triterpén származékokat és nem-kioldható polifenolokat (Vek et al. 2015; Hofmann et al. 2022). A bükk főbb extraktanyagait az 1.5.-3. táblázat foglalja össze.

A fatest többi részének (gyökérszet, hajtás, makk stb.) kémiai összetételére vonatkozóan kevés adat áll rendelkezésre. A gyökérszet kémiai összetételét a tápanyagfelvétel és az elemek metabolizmusa szempontjából vizsgálták. Ezek a kutatások elsősorban a biotikus (Fleischmann et al. 2009) és abiotikus stressznek (pl. szárazság, emelt hőmérséklet, ózon hatás) kitett csemetéket célozták meg, mivel az eredmények az erdőgazdálkodásban hasznosulhatnak. Kimutatták, hogy a stressz hatására a hajszálgökerek tápanyag (N, P, fémek, szénhidrátok) koncentrációja csökken (Zang et al. 2021), változások következnek be a szénhidrát metabolizmusban (keményítő, cukrok) is. Mindezek jelentősen befolyásolják a gyökérszet hosszú távú széntároló képességét (Blessing et al. 2015).

A bükkmakk kémiai összetételének kutatása és hasznosítása elsősorban humán táplálkozási vonatkozásai miatt került előtérbe az utóbbi évtizedekben, mivel fehérje- (19%) és olajtartalma (13%) figyelemreméltó. Az olajtartalom legfontosabb összetevői a trigliceridek (94%), a szterolok (0,9%), a szabad zsírsavak (0,5%) és a foszfolipidek (0,7%) (Prasad & Gülz 1989). A glicerideket felépítő zsírsavak közül a leggyakrabban az olajsav, linolsav és palmitinsav fordulnak elő. A bükkmakk tokoferol (E-vitamin) tartalma 118 mg/100g olaj, ami a többi növényi olajhoz képest viszonylag magasnak számít. Szterolfrakciójában a szitoszterol dominál (Obranović et al. 2024).

1.5.-3. táblázat. A bükk különböző morfológiai egységeinek szerves-extraktanyag összetétele

	Szíjács	Álgeszt	Kéreg	Levél
Vízoldható	<i>Cukrok:</i> mono- és oligoszacharidok, keményítő. <i>Polifenolok:</i> katechinek, procianidinek (pentamerig), kvercetin-, taxifolin-, naringenin-, afzelechin-, izoramnetin-glikozidok, gallusszav vanillinsav, sziringinsav.	<i>Cukrok:</i> nyomokban. <i>Polifenolok:</i> szíjács polifenoljai nyomokban, nem-oldható polifenolok.	<i>Cukrok:</i> keményítő, cukoralkoholok, mono- és oligoszacharidok. <i>Polifenolok:</i> katechinek, procianidinek (pentamerig), kvercetin-, taxifolin-, glikozidok, gallusszav vanillinsav, sziringin, koniferin.	<i>Cukrok:</i> keményítő, cukoralkoholok, mono- és oligoszacharidok, cukorsavak. <i>Karbonsavak:</i> citromsav, aszkorbinsav, almasav, treonsav, aminosavak. <i>Polifenolok:</i> kvercetin-, kempferol-, apigenin-, naringenin- glikozidok, katechinek, procianidinek (oktamerig), kávésav, koniferin, klorogénsav, ferulasav, kumársav származékok.
Nem-vízoldható	<i>Zsírsavak:</i> palmitinsav, linolsav, olajsav, sztearinsav, behénsav. <i>Zsíralkoholok:</i> behénalkohol, tetrakozanol. <i>Terpének:</i> triterpének (szitoszterol, szitosztanol).	<i>Zsírsavak:</i> palmitinsav, linolsav, olajsav, sztearinsav, behénsav. <i>Zsíralkoholok:</i> behénalkohol, tetrakozanol. <i>Terpének:</i> triterpének (szitoszterol, szitosztanol).		<i>Zsírsavak:</i> linolsav, linolénsav, olajsav, sztearinsav. <i>Terpének:</i> diterpének (fitol), triterpének (szitoszterol).

Az álgesztesedés molekuláris folyamatai

Hofmann Tamás, Visiné Rajczy Eszter, Rétfalvi Tamás és Albert Levente

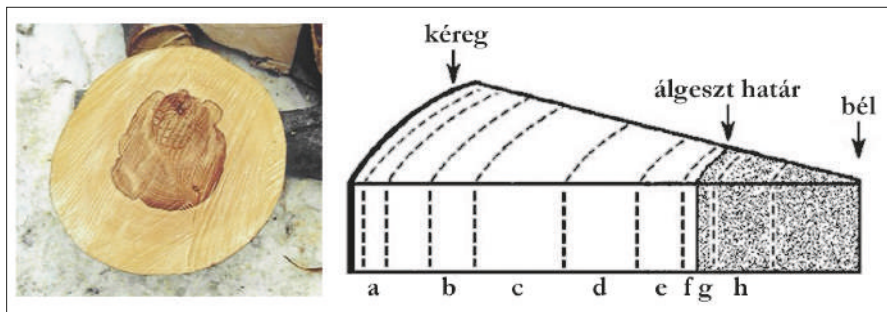
Az álgesztesedés a bükk legfontosabb szerkezeti és szín anomáliája, a fatest nagyméretű, szabálytalan alakú elszíneződése, ami nem követi az évgyűrűhatárokat. Erdészeti és gazdasági jelentősége miatt már több mint másfél évszázada a szakmai és tudományos érdeklődés egyik fontos területe (Ward 1889; Bittmann 1930). Az álgeszt kialakulását, tulajdonságait részletesen a 6.7. fejezet »A bükk álgesztesedése« alfejezete tárgyalja. Hajlamosító tényezőit széles körben kutatták, a legfontosabbaknak a törzsátmérő és a kor bizonyult (Tuzson 1903; Zell et al. 2004). A feltételezett kiváltó okok figyelembevételével modellezték is a folyamatot (Wernsdörfer 2006), egyértelmű kiváltó okait azonban nem sikerült felderíteni. Schwarz három csoportba sorolta a hajlamosító tényezőket: a faegyed jellegzetességei, erdészeti beavatkozások és környezeti paraméterek (Schwarz 1998). Az álgesztesedés visszaszorítására javasolt erdőművelési eljárások (Knocke 2002) nem vezettek a kívánt eredményre, az álgesztesedés egyre gyakoribb az állományok idősebb egyedeinél, elterjedésének a szélsőséges klimatikus jelenségek is kedveznek (Rumpf 1994; Bíró 2005; Varga et al. 2006; Antonucci 2021). Sachsse javaslatára négy álgeszt típust különböztetünk meg: vörös-, csillagos-, seb- és abnormális, vagy patológiás geszt (Sachsse 1991; Seeling 1998).

Az álgesztesedést ma fiziológiai folyamatnak tekintjük (Bosshard 1984). Fakultatív, összetett élettani folyamat, melyben mélyreható morfológiai, faanatómiai és biokémiai változások zajlanak (Dietrichs 1964). A folyamat első, „kiszáradási” szakaszában csökken a nedvességtartalom és a parenchima sejtek vitalitása (Nečesany 1958; Bosshard 1984), ami a vízszállító rendszer funkciójának gyengüléséhez vezet. A második, „pigmentációs” szakaszban levegő jut a törzs belsejébe (Zycha 1948), az oxigén elősegíti a tilliszek képződését (Hofmann 2006) és a vízszállító rendszer fokozatosan elveszti funkcióját. A szöveti matrix megváltozott

kémiai környezetében a színanyag keletkezéséhez vezető molekuláris folyamatok játszódnak le: a színhatáron megemelkedik a pH (Seeling 1991); folyamatos a keményítő és a kioldható szénhidrátok transzportja a határzóna felé (Magel & Höll 1993); az akkumulálódott kioldható szénhidrátok polifenolokká alakulnak (Bauch & Koch 2001); a megemelkedett pH-n a polifenolokból oxidatív, enzimkatalizált polimerizációs reakciókban nagymolekulájú színes anyagok keletkeznek (Seeling & Sachsse 1992), melyek az axiális és radiális parenchima sejtek falára adkrusztáló anyagként rakódnak le (Baum & Bariska 2002). Az egész folyamat ismétlődő szakaszokban, kisebb eltérésekkel valósul meg, ez okozza az inhomogén színt.

Az egészséges és álgesztes bükk faanyag tulajdonságai között alig van különbség, az álgeszt elsősorban esztétikai hibának tekinthető (Molnár et al. 2001; Dzurenda et al. 2023), ennek ellenére a heterogén és instabil szín beszűkíti az álgesztes faanyag felhasználási területeit és kereskedelmi értékét jelentősen csökkenti. Ezen a 2000-es évek erős marketingje sem tudott jelentősen változtatni (Wagemann 2001). A hozzáadott érték növelése volt a célja az Európai Unió nemzetközi programjának is (Innovation for Beech 2004–2007). A színtartósságra és színhomogenizálásra tett kísérletek csak részleges eredményre vezettek (Tolvaj et al. 2001). Az álgeszt roncsolásmentes vizsgálati módszerekkel kimutatható, de az eljárások laboratóriumi körülmények között költségesek, terepi viszonyok között korlátozottak és nehezen kivitelezhetők (Göntz 2018). Az álgesztes bükk faanyag hasznosítási lehetőségeit a 6.7. fejezet »A fehér és az álgesztes bükk faipari célú felhasználása« alfejezete tárgyalja.

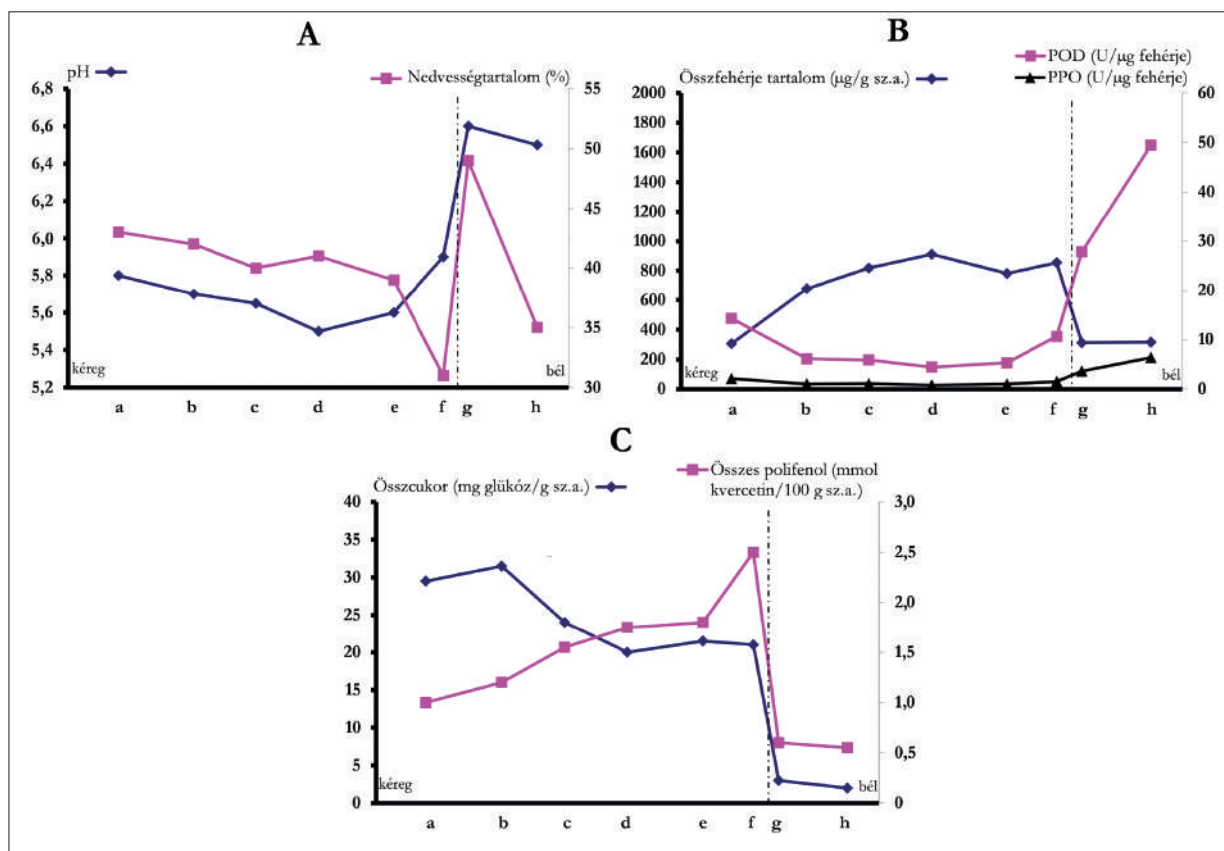
A nemzetközi vonatkozásban is új eredményt hozó hazai kutatások eredményeként sikerült nagyszámú, a folyamatban résztvevő kioldható szénhidrát és polifenol azonosítása; az oxidoreduktáz enzimek szerepének bizonyítása; a színanyag képződésének és szerkezetének azonosítása az álgesztes korongok sugár irányú vizsgálatával (1.5.-1. ábra).



1.5.-1. ábra. Mintavételi helyek az álgesztes korongok sugárirányú kémiai analíziséhez: a. külső szíjács; b. belső szíjács; c. átmeneti zóna; d. külső érett fa; e. belső érett fa; f. határzóna, fehér; g. határzóna, vörös; h. belső álgeszt

Az álgesztesedés folyamataiban a határzóna alacsonyabb nedvességtartalma (Hofmann 2006) és pH emelkedése (szíjács: $5,48 \pm 0,16$, álgeszt: $5,86 \pm 0,18$) feltétele az álgesztesedés biokémiai folyamatainak végebemene- teléhez (Albert et al. 1999). Az álgesztes bükkben a szabad-, kötött- és összes savtartalom a külső szíjácstól a színhatárig emel-

kedik, a színhatár után szignifikánsan csökken (Albert et al. 1998b; Rétfalvi et al. 2004). Az álgeszt előtti faszövetekből szacharóz, glükóz, fruktóz, raffinóz, sztachióz és maltóz mutatható ki, az álgesztben a cukrok csak nyomokban fordulnak elő (Albert et al. 2002; Visi-Rajczi et al. 2003). A polifenolok összkoncentrációja a szíjácstól a határzónáig lassan emelkedik, a határzónában sokszor (de nem mindig) ugrásszerű megemelkedés tapasztalható, majd a színhatár után jelentősen csökken a koncentráció (Albert et al. 2003; Hofmann et al. 2004, 2022). A radiális polifenol koncentráció növekedés és a kioldható szénhidrát koncentráció csökkenés összhangban van, ami arra utal, hogy a kioldható szénhidrátok a polifenolok prekursorai. A határzónában megemelkedik az összes enzim-fehérjetartalom is, ami intenzív élettani folyamatokra utal (Albert et al. 2002, 2005). A peroxidáz (POD) és a polifenol oxidáz (PPO) enzimek aktivitása a határzónában a legmagasabb és az álgeszt belsejében is jelentős marad, ellentétben a kötelező színes gesztesedéssel, ahol a gesztben nincs enzimaktivitás. Az álgeszt pH értékein ($\text{pH} > 6,1$) a PPO enzim fajlagosan aktívabb, mint a POD (Hofmann 2006). Az eredmények bizonyítják a két oxidoreduktáz enzim kiemelkedő szerepét az álgesztesedésben. Az álgesztesedés fontosabb molekuláris résztvevőinek és a faanyag jellemző paramétereinek a sugárirányú változásait az 1.5.-2. ábra mutatja.



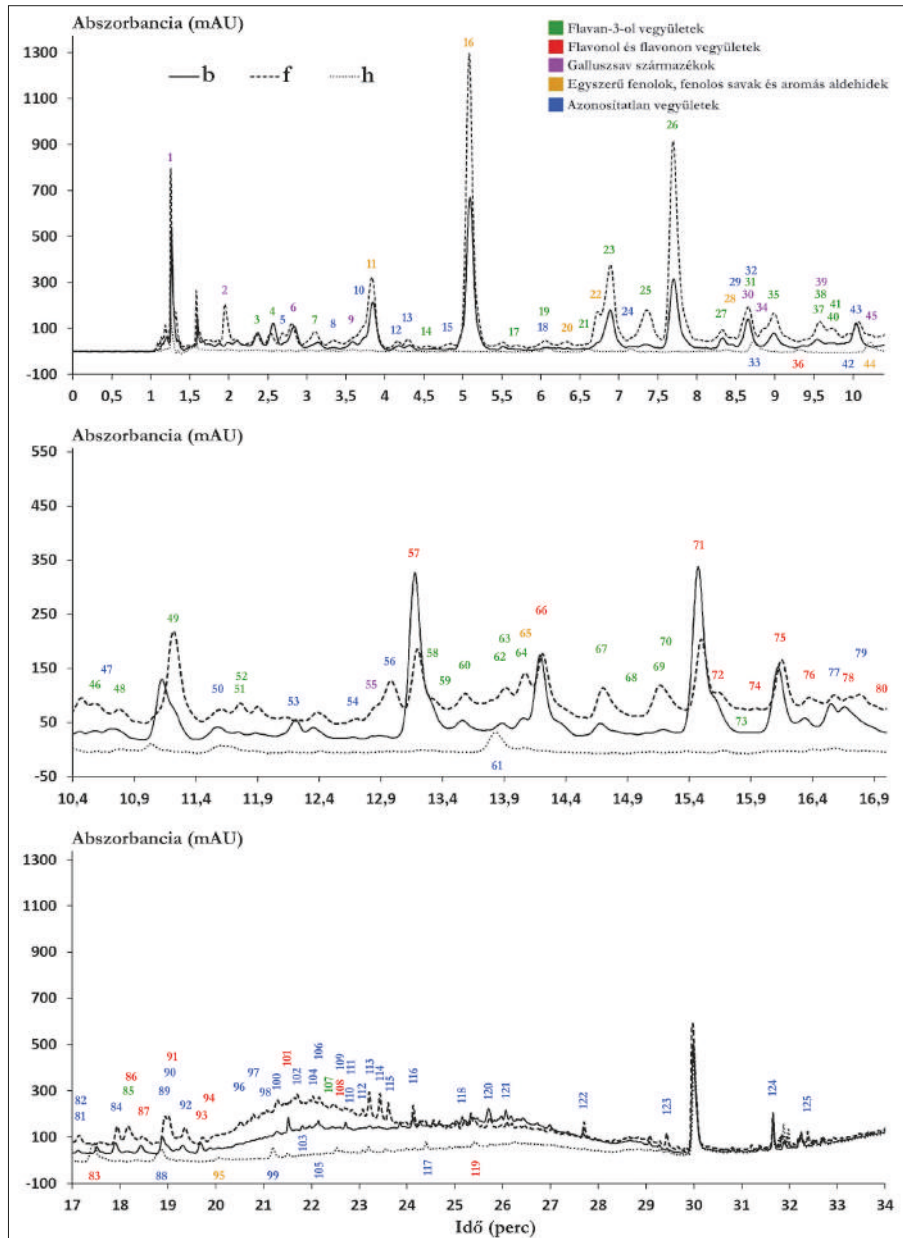
1.5.-2. ábra. Álgesztes bükk faanyag sugár irányú metszetének vizsgálata. A: a pH (kék) és nedvességtartalom (lila); B: az összes enzimek tartalma (kék) és peroxidáz (POD, lila) és polifenol-oxidáz (PPO, fekete) enzimaktivitása; C: összes kioldható szénhidrát (kék) és polifenol tartalom (lila) változása. Az álgeszt határt pont-vonal jelzi. Az a-tól h-ig jelzett mintavételi helyeket az 1.5.-1. ábra mutatja

A színanyagok előanyagainak (prekurzorainak) vizsgálata során összesen 125 polifenolos vegyületet mutattak ki, 71-et azonosítottak a szíjácsból, a határzónából és az álgesztes faanyagból (Hofmann et al. 2022). Több polifenol koncentrációja megemelkedik a színhatáron az *in situ* polifenol-szintézis eredményeként. A legtöbb polifenol koncentrációja a színhatár után erősen csökken. Az alkalmazott mérési módszerekkel az álgesztből csak szabad polifenolokat mutattak ki, nagymolekulájú oxidált polifenol-polimereket nem (Hofmann et al. 2022). Az 1.5.-3. ábra az álgesztes bükk b, f és h szöveteiben lévő polifenolos vegyületek folyadékromatográfiás/tandem tömegspektrometriás elválasztását és azonosítását mutatja. Az álgesztes színanyag részletes tömegspektrometriás analízise során megállapították, hogy az álgeszt színanyagainak egy része valószínűleg katechin származékok nagy molekulatömegű oxidált származéka, melyek semleges oldószerrel nem oldhatók ki és a sejtfal szerkezetébe beépülnek; a másik részét kis molekulatömegű, a szíjácsból felhalmozódott, oxidatív át nem alakult polifenolok alkotják (kvercetin, taxifolin, naringenin, izoramnentin) (Hofmann et al. 2022).

Az álgeszt-színanyag laboratóriumi körülmények közötti (*in vitro*) előállításánál során (vizsgálva az enzimek jelenlétében és hiányában, adott pH-n és prekurzorok mellett megvalósuló reakciókat) megállapították, hogy a megfelelő pH-n, az oxigén, a polifenol prekurzorok, a POD és a PPO bukkenzim jelenlétében színanyag keletkezik. Ha minden egyéb feltétel adott, a reakciók enzimek nélkül is végbemennek, de sokkal lassabban (Hofmann et al. 2008).

Az álgesztesedés folyamatainak különböző magassági szinten történő vizsgálata (egy álgesztes törzs 17 magassági szintjén) kimutatta, hogy kilenc szinten – az előző megállapításokkal megegyezően – az összes cukor koncentráció csökken a kéregtől a belső érettfá szövetekig, emelkedik a tranzicionális zónában és

drámaian csökken a külső álgesztben. Nyolc szinten ettől kismértékben eltérő megoszlást tapasztalható, de a külső álgesztben ezeken a szinteken is koncentráció csökkenést mérhető. Nem csak a radiális megoszlás, hanem a kioldható szénhidrátok összkoncentrációja is magasságfüggő: magas a törzs alsó és felső szakaszában és alacsony a középső szakaszban (Visi-Rajczi et al. 2003, 2022; Visiné Rajczi 2008). A pH és a savtartalmak magasságszerinti változásaiban egyértelmű tendencia nem állapítható meg; a fenolos komponensek minden magassági szinten folyamatosan akkumulálódnak a kéregtől a színhatárig; a totálfenol tartalom a színhatár előtt éri el a maximumot, az álgesztthár után drámaian csökken (Hofmann 2006). Az összpolicfenol és az összes kioldható szénhidrát koncentrációk magasságszerinti vizsgálata azt bizonyítja, hogy kis különbségek vannak, de az álgeszttesedés molekuláris folyamatainak meghatározó lépései minden szinten azonosak.



1.5.-3. ábra. Polifenolos vegyületek elválasztása és azonosítása. HPLC-MS készülékkel kapott kromatogramok álgeszttes bükk sugár irányú metszeteiben, a szíjács (b), a határvonal (f) és az álgeszt (h) szövetekben. A vegyületek elnevezését Hofmann et al. (2022) tartalmazza

A bükk klimatikus alkalmazkodóképességének lehetséges kémiai indikátorai

Hofmann Tamás, Albert Levente és Visiné Rajczi Eszter

A bükk klímaváltozásra adott válaszreakciói különböző klimatikus környezetből származó populációk azonos környezetbe való áttelepítésével követhetők (lásd az 1.4. fejezet »A bükk fenotípusos változatossága származási kísérletekben« alfejezetét). Az új környezethez való alkalmazkodási potenciált (az eredeti származási hely klímája szerinti) genetikai alkalmazkodottság határozza meg, ezért a telepített populációk az őket ért különböző stresszhatásokra eltérő válaszokat adnak. A stresszfaktorok túlnyomó többsége oxidatív stresszt vált ki, amely a prooxidánsok és az antioxidánsok közt fellépő, a prooxidánsok javára történő egyensúly-eltolódás (Sies 1991). Válaszként az oxidatív stresszre a növény aktiválja a reaktív oxigénformákat elimináló enzimes és nem-enzimes antioxidáns rendszereit. A glutation rendszer (Tausz et al. 2004) és más specifikus stressz fehérjék, az oxidázenzimek, illetve izoenzimjeik, és egyes polifenolok minőségi és mennyiségi spektrumainak változásai közvetve jellemzik a növényi stresszt. Ezek az élettani markerek (biomarker) lehetővé teszik az alkalmazkodó képesség kémiai/biokémiai úton történő követését. Ennek vizsgálatára az ún. „származási kísérletek” vagy közös tenyészkerteri kísérletek szolgálnak lehetőséget (Kebert et al. 2024).

A Soproni Egyetem kutatói több éven át vizsgálták a bucsutai közös tenyészkerterben kiválasztott hat bükk származás (Farchau (D), Pidkamin (UA), Torup (S), Gråsten (DK), Bánokszentgyörgy (H), Magyaregregy (H)) csemetéiről vett levelek enzimes és nem-enzimes antioxidáns rendszereit (Visi-Rajczi et al. 2021). A vizsgált bükkgyedek eredeti termőhelyükön mérsékelt kontinentális (Bánokszentgyörgy, Magyaregregy), szélsőségesen kontinentális (Pidkamin), vagy atlanti klíma hatása alatt álltak (Farchau, Torup, Gråsten). A származások ABTS (2,2'-azino-di-(3-etilbenzotiazolin)-6-szulfonsav) antioxidáns kapacitása átfogó képet ad az oxidatív stresszről (Hassan et al. 2017). Az átlagos mellmagassági átmérő alapján leggyengébb növekedéssel jellemezhető származások ABTS antioxidáns kapacitása kiemelkedően magas, a jó teljesítményűeké alacsony (1.5.-4. táblázat).

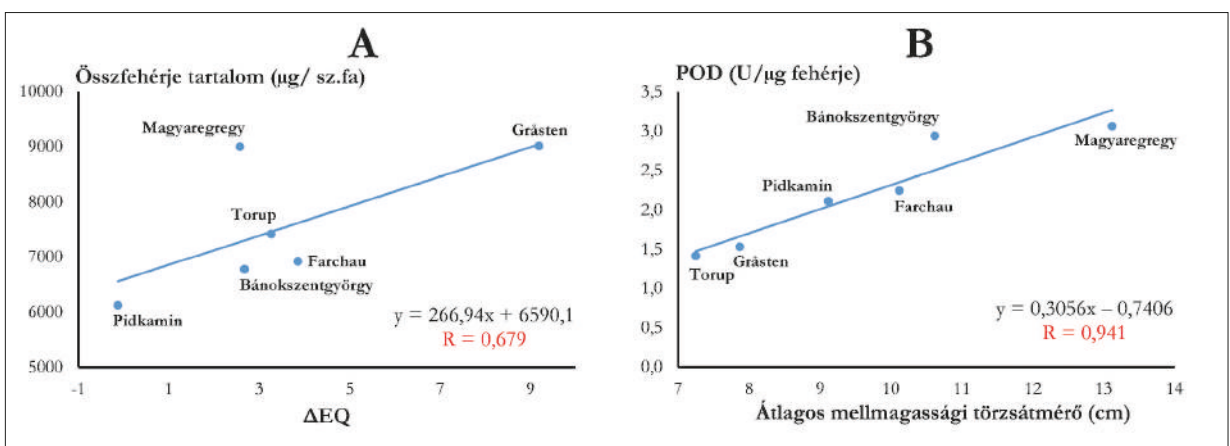
1.5.-4. táblázat. Átlagos törzsátmérő (cm), ABTS (2,2'-azinodi-(3-etilbenzotiazolin)-6-szulfonsav gyök reakcióján alapuló antioxidáns kapacitás, mg trolox/g sz.a) és Ellenberg-index (EQ) a vizsgált származások esetében. Az eredmények: átlag ± szórás. A $p < 0,01$ szinten lévő szignifikáns különbségeket ($n=8$) egy adott sorban különböző kisbetűs kitevők jelölik

	Származások					
	Farchau (D)	Pidkamin (UA)	Torup (S)	Bánokszentgyörgy (H)	Magyaregregy (H)	Gråsten (DK)
ABTS	120,7 ± 49,7 ^a	155,8 ± 27,9 ^a	202,1 ± 33,2 ^{ab}	163,5 ± 78,7 ^a	178,2 ± 54,9 ^a	296,2 ± 84,4 ^b
Átl. törzsátmérő	6,4 ± 2,5 ^a	7,4 ± 1,7 ^{ab}	5,1 ± 2,2 ^a	8,6 ± 2,8 ^{ab}	11,4 ± 4,6 ^b	5,6 ± 1,7 ^a
EQ	25,59	29,58	26,18	26,77	26,87	20,26

Összehasonlították a különböző származások leveleinek összfehérje-tartalmát, valamint peroxidáz (POD) enzim aktivitását. Az összfehérje-tartalom arányos a levélzimek mennyiségével (Bradford 1976), meghatározása szükséges az enzimaktivitások kiszámításához (U/μg fehérje) is. A POD enzim bizonyítottan részt vesz a növények stressz folyamatokkal szembeni védekezési mechanizmusában (Albert et al. 2002), a bükk esetében is indikátora a klímához való alkalmazkodásnak (Puccinelli et al. 1998; Zolfaghari et al. 2010). A bükk levelekből 44 polifenolt azonosítottak (38-at név szerint) és kiválasztották közülük a leghatékonyabb polifenolos antioxidánsokat, amelyek kiemelt jelentőségűek a védekezési és adaptációs folyamatokban (Hofmann et al. 2017a). (A vonatkozó kromatogramot az 1.5.-7. ábra mutatja.) A leghatékonyabb antioxidáns levél polifenolok: kvercetin-O-hexozid 1 (35), kvercetin-O-hexozid 2 (37), koniferin származék

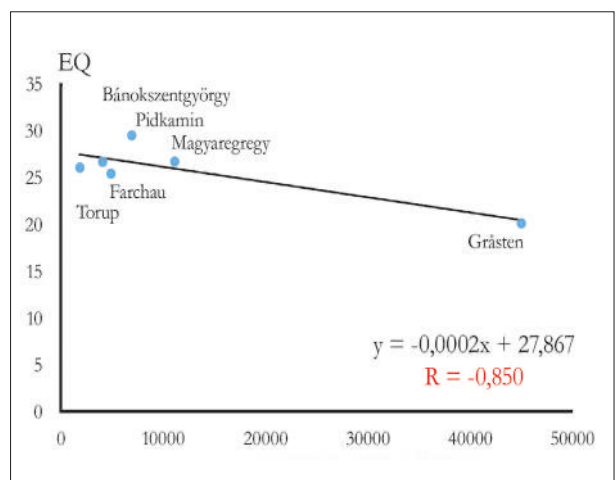
2 (40), (+)-katechin (11), (-)-epikatechin (20), kvercetin-O-pentozid (39), kávésav-O-hexozid (2), kempferol-O-hexozid 2 (41), procianidin B dimer 3 (15), procianidin C trimer 3 (14) és procianidin C trimer 4 (17).

Az antioxidáns rendszerek mérési eredményei korrelálnak a populációk eredeti klimatikus paraméterével, az Ellenberg-index-szel (EQ) és az ökológiai távolsággal (ΔEQ), valamint az átlagos átmérővel jellemzett növekedésükkel. Az 1.5-4a. ábra az ökológiai távolság (ΔEQ) változása és a származások összfehérje-tartalma közötti korrelációt szemlélteti. Az ökológiai távolság alkalmas a bükk alkalmazkodó-képessége, illetve az elszenvedett szárazsági stressz jellemzésére (Mátyás 1994; Czúcz et al. 2013). Az eredetileg melegebb és szárazabb klímához adaptálódott, stressztűrő származások (kisebb ΔEQ -val, pl. Pidkamin) alacsonyabb összfehérje tartalmúak, mint a hűvösebb és csapadékosabb klímához alkalmazkodottak (nagyobb ΔEQ -val, pl. Grästen). Szignifikáns pozitív kapcsolat ($p < 0,15$) van a származások POD enzim aktivitása és átlagos mellmagassági törzsátmérője között (1.5.-4b. ábra). A gyenge növekedésű és rossz megmaradású populációk (Grästen, Torup) POD enzim aktivitása alacsony, a jobb növekedésűeké (Magyaregregy, Bánokszentgyörgy) nagy.



1.5.-4. ábra. A: Korreláció az ökológiai távolság (ΔEQ) és a származások összfehérje-tartalma között (szignifikáns: $p < 0,15$); B: Korreláció az átlagos mellmagassági törzsátmérő és a peroxidáz enzim (POD) aktivitása között (szignifikáns: $p < 0,15$)

A származások polifenoljainak elválasztása során a kromatogramokban a csúcs alatti (a koncentrációval arányos) területek és az EQ értékek közötti szignifikáns negatív korrelációt ($p < 0,05$) állapítottak meg. Eszerint a nagyobb EQ -val rendelkező (melegebb és szárazabb klímából származó és előalkalmazkodott) bükk származások (pl. Pidkamin) kisebb koncentrációban tartalmaznak több, nagy antioxidáns hatékonyságú vegyületeket (pl. (+)-katechin, procianidin C trimer és procianidin B dimer), mivel kisebb stressz éri őket. A hűvösebb és csapadékosabb régiókból származó, alacsonyabb EQ -val rendelkezők (pl. Grästen) populációkat nagyobb stressz éri, erre adott válaszuk a nagyobb antioxidáns polifenol termelés (1.5-5. ábra). A vizsgált polifenolos összetevők közül egyik sem mutatott szignifikáns pozitív kapcsolatot ($p < 0,05$) az átlagos mellmagassági törzsátmérővel.



1.5.-5. ábra. Korreláció a procianidin C trimer 3 koncentráció (x tengely: kromatográfias csúcssterület) és az Ellenberg-index (EQ) között (szignifikancia: $p < 0,05$)

A kutatási eredmények azt bizonyítják, hogy az ABTS antioxidáns kapacitás, az összfehérje tartalom, a POD enzim aktivitás és az aktív polifenol vegyületek koncentrációja kémiai úton jelzi az alkalmazkodóképességet, annak indikátora lehet. A jól alkalmazkodó populációkat alacsonyabb ABTS antioxidáns kapacitás, kis polifenol koncentráció és összfehérje tartalom, valamint nagy POD enzim aktivitás jellemzi. A rossz alkalmazkodó képességű származásoknál mindez fordítva van. Ezek a megállapítások hasznosíthatók a klímaváltozás hatásainak előre jelzésénél és a klímaterelens bükk szaporítóanyag jövőbeli kiválasztásánál.

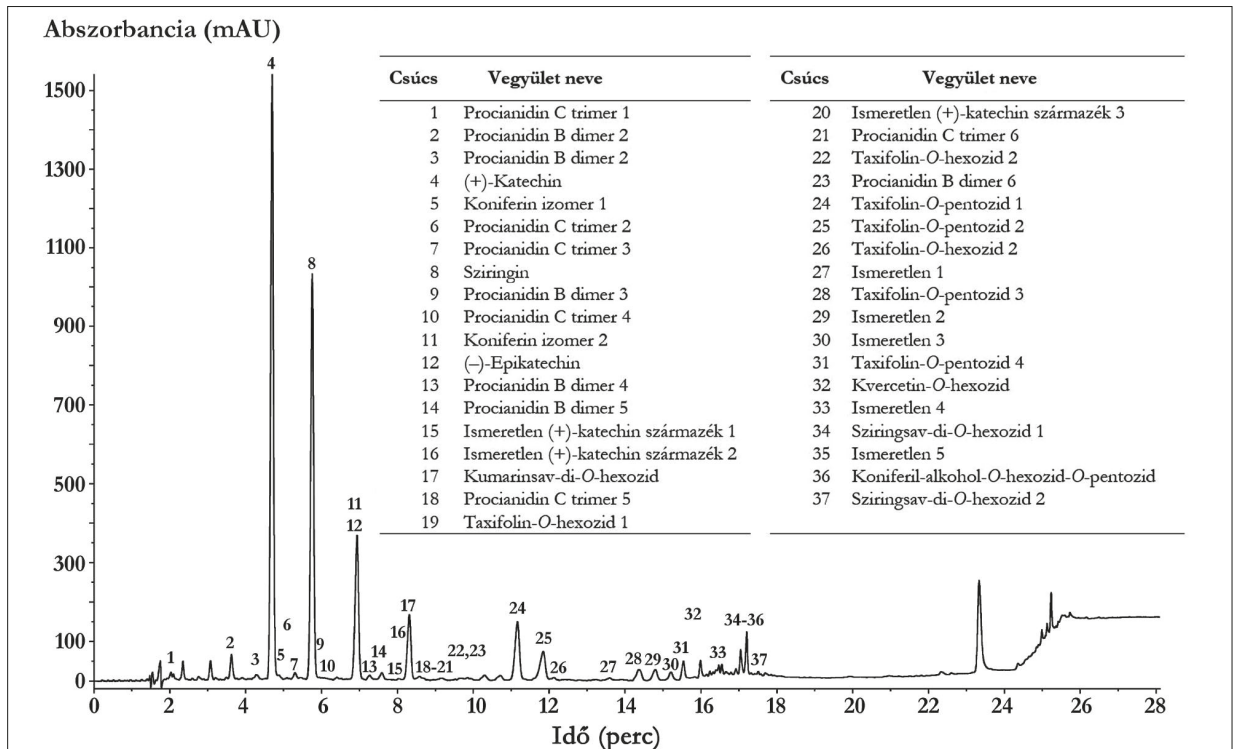
Antioxidáns polifenolok kinyerése és hasznosítása bükk szövetekből

Hofmann Tamás, Visiné Rajczy Eszter és Albert Levente

Az erdészeti és mezőgazdasági hulladék biomassza (pl. kéreg, levél, toboz, szilázs stb.) hasznosítása az elmúlt évtizedekben világszerte fontos kutatási témává vált, amit a környezetvédelmi előírások, a különböző természeti erőforrások és a növekvő alapanyagárak is indokolnak (Titus et al. 2021). Az erdészeti melléktermékek felhasználása és újrahasznosítása támogatja a körforgásos- és helyi gazdaságot, hozzájárul a fenntarthatósághoz, így a fenntartható erdőgazdálkodáshoz is (Hasegawa et al. 2022). Az értékesíthető biomassza mennyisége jelentős: egyedül a rönkfa feldolgozásából csak Európában évente 60–70 millió m³ kéreg keletkezik (ebből Magyarországon 500–600 ezer m³), ami számottevő potenciált jelent (Pásztor et al. 2016). A hasznosítás területei az energetika (Makk et al. 2017), a bioaktív vegyületek kinyerése (Verkasalo et al. 2022), a kompozit anyagok gyártása (Avcı et al. 2018), a környezetvédelem (Hussain et al. 2019) és a nanotechnológia (Sutrisno et al. 2020). A mezőgazdasági hulladék biomasszából kinyerhető antioxidáns polifenol vegyületek (Hofmann et al. 2023) felhasználhatók természetes élelmiszer-adalékanyagként és színezékként (Tada et al. 2011), antibakteriális adalékként csomagolóanyagokban (Díez-Pascual 2020), természetes élelmiszer-tartósítóként (Raitanen et al. 2020), faanyagvédőszerként (Vek et al. 2020), valamint fém nanoszemcsék (Burlacu et al. 2019) és egészségügyi termékek összetevőinek előállításában (Häsler Gunnarsdottir et al. 2023). Az utóbbi két évtizedben a bükk törzs különböző részeinek antioxidáns, bioaktív vegyületeit (kiemelten a polifenolokat) és azok hasznosíthatóságát több hazai és nemzetközi kutatócsoport is vizsgálta, ami szintén igazolja a kutatás, fejlesztés és innováció fontosságát. A bükk kéreg antioxidánsainak kivonása során összevetették a különböző extrakciós módszerek hatékonyságát. Megállapították, hogy szobahőmérsékleten az etanolos oldószer használata előnyösebb, mint a metanolos és magas nyomáson és hőmérsékleten a víz az alkoholos elegyekhez hasonló hatékonyságú kivonószer (1.5.-5. táblázat), ami alapját képezheti „zöld” (szerves oldószer mentes), környezetbarát extrakciós módszerek kidolgozásának. Elsőként választották el és azonosították a bükk kéreg polifenoljait, és elsőként határozták meg a kéreg kivonatok antioxidáns kapacitását (Hofmann et al. 2015a). A bükk kéreg polifenoljainak kromatogramját az 1.5.-6. ábra mutatja.

1.5.-5. táblázat. Különböző oldószer elegyekkel, mikrohullámú extrakcióval kinyert bükk kéreg kivonatok antioxidáns kapacitás értékei (TPC: összes polifenol tartalom (mg kvercetin/g sz.a.); FRAP: vas(III)-redukálóképességen alapuló antioxidáns kapacitás (mg aszkorbinsav/g sz.a.); ABTS: 2,2'-azinodi-(3-etilbenzotiazolin)-6-szulfonsav gyök reakcióján alapuló antioxidáns kapacitás (mg trolox/g sz.a.); DPPH: 2,2-difenil-1-pikrilhidrazil gyök reakcióján alapuló antioxidáns kapacitás (IC50: az 50%-os inhibícióhoz tartozó koncentráció, µg extraktanyag/ml extraktum))

Oldószer	TPC	FRAP	ABTS	DPPH
Metanol:víz 80:20 v/v	58,1 ± 0,37	41,1 ± 2,83	166 ± 2,45	13,5 ± 1,43
Etanol:víz 80:20 v/v	65,2 ± 5,57	40,3 ± 2,81	139 ± 7,61	13,0 ± 0,51
Víz	57,7 ± 0,40	45,4 ± 2,73	166 ± 4,69	13,2 ± 1,38



1.5.-6. ábra. A bükk kéreg polifenoljainak elválasztása és azonosítása (HPLC-PDA kromatogram, 250–380 nm)

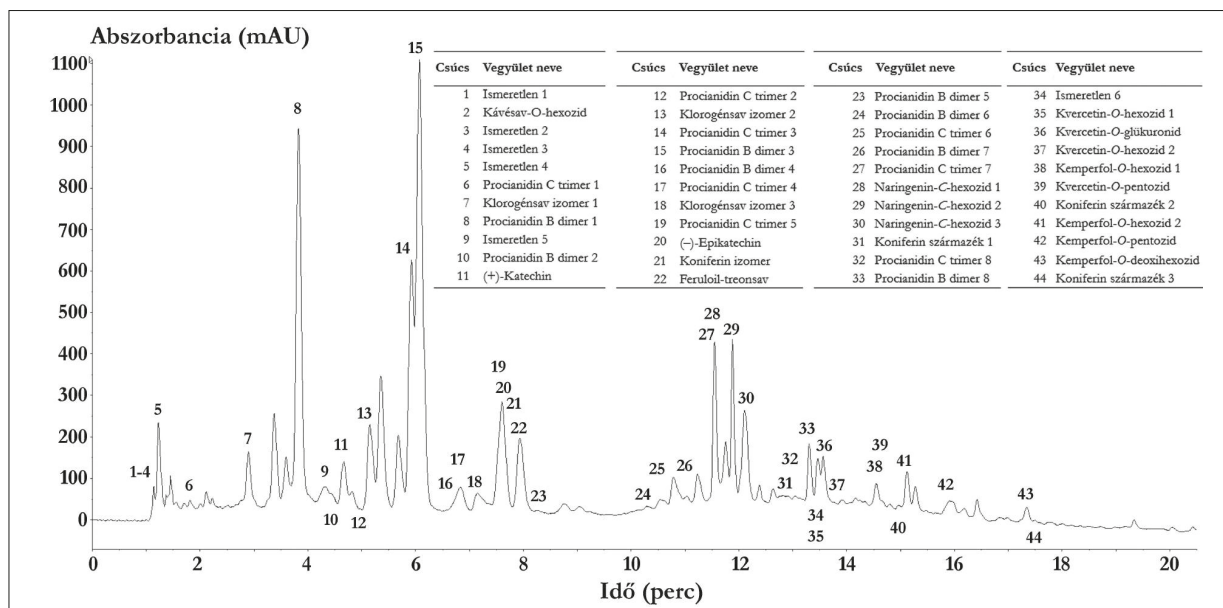
A legjelentősebb mennyiségben előforduló vegyületek a flavan-3-olok (katechinek, procianidinek), a flavonoid- (taxifolin és kvercetin) glikozidok, valamint az egyszerű fenol- (koniferil-alkohol, szinapil-alkohol) és fenolsav- (kumársav, sziringinsav) származékok (Hofmann et al. 2015b). Meghatározták az antioxidáns hatásért leginkább felelős vegyületeket is: (+)-katechin, procianidin B dimer 2, ismeretlen 5 és a (-)-epikatechin (Hofmann et al. 2017b). Ezek az eredményeik lehetővé teszik az extrakció célirányos optimalizálását.

A magas polifenol tartalmú bükkkéreg kivonatok több területen hasznosíthatók. Tănase és munkatársai bizonyították jelentős *in vitro* aktivitásukat baktériumtörzsekkel szemben, és mérhető alfa-glükózidáz inhíbeáló képességüket (Tănase et al. 2019a). Megállapították, hogy a bükk kivonatokkal kezelt citromfű magvak csírázóképesége, a csírázó növénykéek növekedése és klorofill tartalma szignifikánsan magasabb, mint a kontrol növénykéeké. A kivonatok hatására a szár lignifikációs folyamatai is felerősödnek (Tănase et al. 2019b).

A bükk levél antioxidáns polifenoljainak elválasztását és azonosítását az 1.5.-7.-ábra szemlélteti. A szerkezet azonosításával és az egyes vegyületek bioaktivitásának kutatásával lehetővé válik a bioaktivitást leginkább meghatározó vegyületekben gazdag kivonatok előállításának (Cadahía et al. 2015; Formato et al. 2021; Hofmann et al. 2017a, 2022; Visi-Rajczi et al. 2021).

A bükklevél kivonatokban található antioxidánsoknak (polifenolok, triterpén-glikozidok) jótékony élettani hatása van, felhasználják őket a népi gyógyászatban (lázcsillapító hatás, bőrbetegségek kezelése, emésztési és légzési panaszok kezelése), bizonyított antibakteriális és antiproliferatív hatásukat is (Pirvu et al. 2013; Formato et al. 2021).

A bükk és más magyarországi erdei fafajok levelei antioxidáns tartalmának szezonális változásait az 1.5.-6. táblázat foglalja össze. A különböző (DPPH, FRAP, ABTS) módszerekkel meghatározott antioxidáns hatást egy kombinált pontrendszer segítségével összevetve megállapították, hogy a bükklevelek antioxidáns kapacitása átlagosnak mondható, a legmagasabb értékek (hasonlóan a többi fajhoz) kora ősszel mérhetők (Tálos-Nebehaj et al. 2017).



1.5.-7. ábra. A bükk levélpolifenolok elválasztása és azonosítása (HPLC-PDA kromatogram, 250–380 nm)

1.5.-6. táblázat. Különböző fajok leveleinek pontrendszer alapján összesített antioxidáns kapacitása a FRAP (vas(III)-redukálóképességen alapuló antioxidáns kapacitás), ABTS (2,2'-azinodi-(3-etilbenzotiazolin)-6-szulfonsav gyök reakcióján alapuló antioxidáns kapacitás) és a DPPH (2,2-difenil-1-pikrilhidrazil gyök reakcióján alapuló antioxidáns kapacitás) módszerek alapján, a május–szeptemberi időszakban. Maximális pontszám: 3

Fafaj	Május	Június	Július	Augusztus	Szeptember
Bükk	1,21	1,26	1,25	1,14	1,57
Gyertyán	2,65	2,59	2,54	2,85	2,48
Szelídgesztenye	2,50	2,41	1,87	2,50	2,53
Akác	1,30	1,14	1,30	0,52	1,41
Korai juhar	1,62	2,27	1,76	2,34	2,02
Molyhos tölgy	1,67	1,73	1,77	1,93	2,03
Csertölgy	2,68	2,32	1,99	2,44	2,27
Kocsányos tölgy	1,84	1,74	1,38	1,49	2,01
Kocsánytalan tölgy	1,94	1,65	1,79	1,74	2,32
Nyár	0,50	1,11	0,90	1,31	1,35
Erdeifenyő	0,50	0,58	0,44	0,18	0,42
Feketeenyő	0,90	1,27	1,32	1,25	1,09

A bükk szijács és álgeszt polifenolok nagy felbontású kromatográfias elválasztását és az összetevők azonosítását az 1.5.-3. ábra szemlélteti (Hofmann et al. 2022). Bizonyított a bükk faanyag extraktumok antibakteriális hatása (Vek et al. 2013; Hosseinihashemi et al. 2016) és élesztőgombák általi lebonthatóságának papíripari hasznosíthatósága (Košíková et al. 2008). A bükk kéreg, levél és faanyag bioaktív polifenol tartalmával kapcsolatos eredmények a tudományos megismerés jelentős bővítésén túl alapját képezhetik a hazai alapanyagokat felhasználó csomagolóanyagok, antibakteriális szerek és fém nanorészecskék kifejlesztésének.

Irodalom

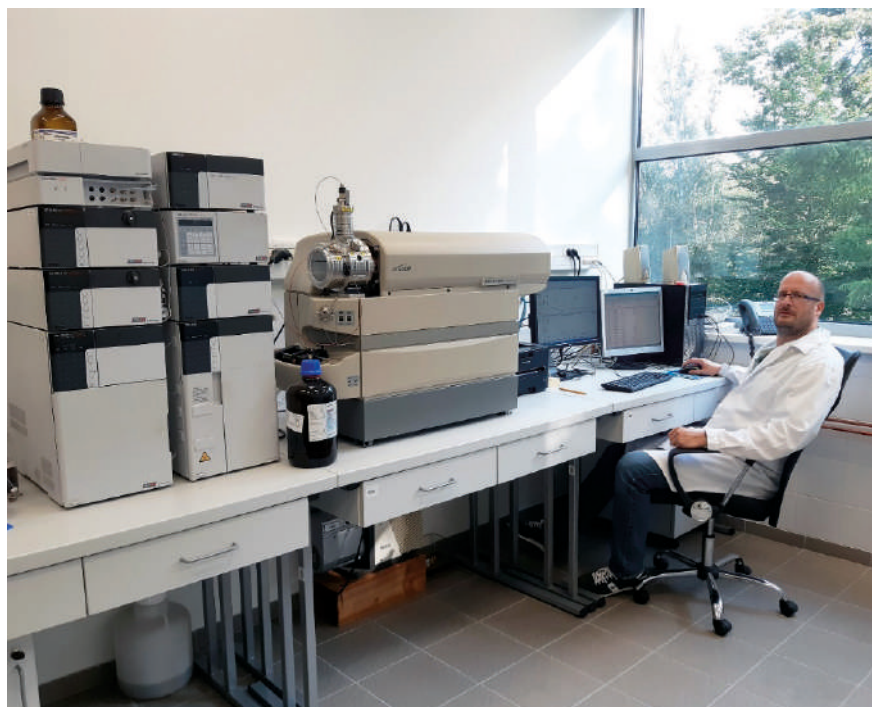
- Akgül M. & Tozluoglu A. 2009: Some chemical and morphological properties of juvenile woods from beech (*Fagus orientalis* L.) and pine (*Pinus nigra* A.) plantations. – Trends in Applied Sciences Research 4(2): 116–125.
- Albert L. 1999: A vörösgeszt bükk (*Fagus sylvatica* L.) faanyagának kémiai vizsgálata. – Habilitációs értekezés, Erdészeti és Faipari Egyetem, Sopron, pp. 37–53.
- Albert L., Hofmann T., Németh Zs. I., Rétfalvi T., Koloszar J., Varga Sz. & Csepregi I. 2003: Radial variation of total phenol content in beech (*Fagus sylvatica* L.) wood with and without red heartwood. – Holz als Roh- und Werkstoff 61(3): 227–230.
- Albert L., Hofmann T., Rétfalvi T., Németh Zs. I., Koloszar J., Varga Sz. & Csepregi I. 2005: A fenoloidok, a polifenol-oxidáz és a peroxidáz szerepe a bükkálgeszt kialakulásában. In: Solymos Rezső (szerk.): Erdő- és fagazdaságunk időszerű kérdései. – MTA Erdészeti Bizottságának Kiadványa, Budapest, pp. 161–176.
- Albert L., Hofmann T., Visi-Rajcz E., Rétfalvi T., Németh Zs. I., Koloszar J. & Csepregi I. 2002: Relationships Among Total Phenol and Soluble Carbohydrate Contents And Activities of Peroxidase and Polyphenol Oxidase in Red-Heartwooded Beech (*Fagus sylvatica* L.). – 7th European Workshop on Lignocellulosics and Pulp, Turku/Abo, Finland, Proceedings, pp. 253–256.
- Albert L., Németh Zs. I., Halász G., Bidló A., Koloszar J., Varga Sz. & Takács L. 1998a: Elterések a vörös gesztű bükk (*Fagus sylvatica* L.) faanyagának kémiai paramétereiben. – Faipar 46(1): 36–37.
- Albert L., Németh Zs. I., Halász G., Koloszar J., Varga Sz. & Takács L. 1998b: A szabad és kötött savtartalom sugárirányú változása a vörös gesztű bükk (*Fagus sylvatica* L.) faanyagában. – Faipar 46(2): 23–24.
- Albert L., Németh Zs. I., Halász G., Koloszar J., Varga Sz. & Takács L. 1999: Radial variation of pH and buffer capacity in the red-heartwooded beech (*Fagus sylvatica* L.) wood. – Holz als Roh- und Werkstoff 57: 75–76.
- Antonucci S., Santopuoli G., Marcetti G., Marchetti M., Tognetti R., Chiavetta U. & Garfi V. 2021: What Is Known About the Management of European Beech Forests Facing Climate Change? A Review. – Current Forestry Reports 7(4): 321–333.
- Avcı E., Acar M., Gonultas O. & Candan Z. 2018: Manufacturing Biocomposites Using Black Pine Bark and Oak Bark. – BioResources 13: 15–26.
- Bauch J. & Koch G. 2001: Biologische und chemische Untersuchungen über Holzverfärbungen der Rotbuche (*Fagus sylvatica* L.) und Möglichkeiten. Final Report. – Bundesforschungsanstalt für Forstund Holzwirtschaft, Hamburgi Egyetem, 66 pp.
- Baum S. & Bariska M. 2002: Der falsche Kern: Buchenrotkern. – Holz-Zentralblatt 128: 633.
- Bíró B. 2005: A bükk álgeszttesedés vizsgálata a Somogyi Erdészeti és Faipari Részvénytársaság erdőállományaiban. – Doktori (PhD) értekezés, Nyugat-Magyarországi Egyetem, Sopron.
- Bittmann O. 1930: „Frostkern” der Rotbuche. – Holzmarkt 22(135): 3–4.
- Blessing C.H., Werner R.A., Siegwolf R. & Buchmann N. 2015: Allocation dynamics of recently fixed carbon in beech saplings in response to increased temperatures and drought. – Tree Physiology 35(6): 585–598.
- Bodirlau R., Teaca C.A. & Spiridon I. 2008: Chemical modification of beech wood: effect on thermal stability. – BioResources 3(3): 789–800.
- Bosshard H.H. 1984: Holzkunde. Zur Biologie, Physik und Chemie des Holzes. – Birkhauser Verlag Basel/Stuttgart.
- Bradford M.M. 1976: A rapid and sensitive method for the quantitation of microgram quantities of protein utilizing the principle of protein-dye binding. – Analytical Biochemistry 72: 248–254.
- Brózdowski J., Waliszewska B., Sieradzka A. & Spek A. 2018: Chemical composition of beech bark stripped and not stripped by animals. – Annals WULS – SGGW, Forestry and Wood Technology 104: 420–425.
- Burlacu E., Tănase C., Coman N.A. & Berta L. 2019: A Review of Bark-Extract-Mediated Green Synthesis of Metallic Nanoparticles and Their Applications. – Molecules 24: 4354.
- Cadahía E., Fernández De Simón B., Aranda I., Sanz M., Sánchez-Gómez D. & Pinto E. 2015: Non-targeted Metabolomic Profile of *Fagus Sylvatica* L. Leaves using Liquid Chromatography with Mass Spectrometry and Gas Chromatography with Mass Spectrometry. – Phytochemical Analysis 26(2): 171–182.
- Czucz B., Gálhidy L. & Mátyás Cs. 2013: A bükk és a kocsánytalan tölgy elterjedésének szárazsági határa. – Erdészettudományi Közlemények 3: 39–53.
- Dietrichs H. H. 1964: Studies of the chemistry and physiology of the transformation of sapwood into heartwood in *Fagus sylvatica* L. A contribution to the problem of heartwood formation. – Mitteilung Bundesforschungsanstalt f. Forst- und Holzwirtschaft 58: 141.

- Díez-Pascual A.M. 2020: Antimicrobial Polymer-Based Materials for Food Packaging Applications. – *Polymers* (Basel) 12: 731.
- Dzurenda L., Dudiak M. & Kučerová V. 2023: Differences in Some Physical and Chemical Properties of Beechwood with False Heartwood, Mature Wood and Sapwood. – *Forests* 14(6): 1123.
- Fleischmann F., Winkler J.B. & Oßwald W. 2009: Effects of ozone and *Phytophthora citricola* on non-structural carbohydrates of European beech (*Fagus sylvatica* L.) saplings. – *Plant and Soil* 323(1–2): 75–84.
- Formato M., Piccolella S., Zidorn C. & Pacifico S. 2021: UHPLC-HRMS Analysis of *Fagus sylvatica* (*Fagaceae*) Leaves: A Renewable Source of Antioxidant Polyphenols. – *Antioxidants* 10(7): 1140.
- Göntz B. 2018: Bükk álgeszt kimutatása elektromos mérés segítségével. – Doktori (PhD) értekezés, Soproni Egyetem, Sopron, pp. 35–41.
- Häsler Gunnarsdottir S., Sommerauer L., Schnabel T., Oostingh G.J. & Schuster A. 2023: Antioxidative and Antimicrobial Evaluation of Bark Extracts from Common European Trees in Light of Dermal Applications. – *Antibiotics* 12: 130.
- Hassan W., Noreen H., Rehman S., Gul S., Kamal M. A., Kamdem J.P., Zaman B. & da Rocha J.B.T. 2017: Oxidative Stress and Antioxidant Potential of One Hundred Medicinal Plants. – *Current Topics in Medical Chemistry* 17(12): 1336–1370.
- Hassegawa M., Van Brusselen J., Cramm M. & Verkerk P.J. 2022: Wood-Based Products in the Circular Bioeconomy: Status and Opportunities towards Environmental Sustainability. – *Land* 11: 2131.
- Hofmann T. 2006: A kémiai paraméterek szerepe a bükk (*Fagus sylvatica* L.) álgesztesedésében. – Doktori (PhD) értekezés, Nyugat-magyarországi Egyetem, Sopron.
- Hofmann T., Albert L. & Rétfalvi T. 2004: Quantitative TLC analysis of (+)-catechin and (-)-epicatechin from *Fagus sylvatica* (L.) with and without red heartwood. – *Journal of Planar Chromatography* (17): 350–354.
- Hofmann T., Albert L., Rétfalvi T., Bányai- Stefanovits É., Visi-Rajczi E., Börcsök E., Németh Zs. I., Kolozsár J., Varga Sz. & Csepregi I. 2002: A peroxidáz és polifenol-oxidáz enzimek aktivitásának sugárirányú vizsgálata álgesztes bükkben (*Fagus sylvatica* L.). In: Albert L. & Börcsök E. (szerk.): A Kémiai Intézet tudományos ülése. – Nyugat-magyarországi Egyetem, Erdőmérnöki Kar, Intézeti Kiadvány, Sopron, pp. 102–106.
- Hofmann T., Albert L., Retfalvi T., Visi-Rajczi E. & Brolly G. 2008: GTLC analysis of the in-vitro reaction of beech (*Fagus sylvatica* L.) wood enzyme extract with catechins. – *Journal of Planar Chromatography – Modern TLC* 21 (2): 83–88.
- Hofmann T., Albert L. & Visi-Rajczi E. 2023: Utilization of forestry by-products as a source of natural antioxidants from Hungarian forests. – *Chemical Engineering Transactions* 107: 667–672.
- Hofmann T., Guran R., Zitka O., Visi-Rajczi E. & Albert L. 2022: Liquid Chromatographic/Mass Spectrometric Study on the Role of Beech (*Fagus sylvatica* L.) Wood Polyphenols in Red Heartwood Formation. – *Forests* 13(1): 10.
- Hofmann T., Nebehaj E. & Albert L. 2015a: The high-performance liquid chromatography/multistage electrospray mass spectrometric investigation and extraction optimization of beech (*Fagus sylvatica* L.) bark polyphenols. – *Journal of Chromatography A* 1393: 96–105.
- Hofmann T., Nebehaj E., Stefanovits-Bányai É. & Albert L. 2015b: Antioxidant capacity and total phenol content of beech (*Fagus sylvatica* L.) bark extracts. – *Industrial Crops and Products* 77: 375–381.
- Hofmann T., Tólos-Nebehaj E. & Albert L. 2017a: Leaf Polyphenols as Indicators of Climatic Adaptation of Beech (*Fagus sylvatica* L.) – an HPLC-MS/MS via MRM Approach. – *International Labmate* 42 (3): 12–14.
- Hofmann T., Tólos-Nebehaj E., Albert L. & Németh L. 2017b: Antioxidant efficiency of Beech (*Fagus sylvatica* L.) bark polyphenols assessed by chemometric methods. – *Industrial Crops and Products* 108: 26–35.
- Hofmann T., Wetzig M., Rétfalvi T., Sieverts T., Bergemann H. & Niemz P. 2013: Heat-treatment with the vacuum-press dewatering method: Chemical properties of the manufactured wood and the condensation water. – *European Journal of Wood and Wood Products* 71(1): 121–127.
- Hosseinihashemi S.K., Salem M.Z.M., Hossein Ashrafi S.K. & Latibari A.J. 2016: Chemical Composition and Antioxidant Activity of Extract from the Wood of *Fagus orientalis*: Water Resistance and Decay Resistance against *Trametes versicolor*. – *BioResources* 11(2): 3890–3903.
- Hussain S., Ghouri A.S. & Ahmad A. 2019: Pine cone extract as natural coagulant for purification of turbid water. – *Heliyon* 5: e01420.
- Kamperidou V., Lykidis C. & Barmpoutis P. 2018: Utilization of wood and bark of fast-growing hardwood species in energy production. – *Journal of Forest Science* 64(4)1: 164–170.
- Keber M., Stojnić S., Rašeta M., Kostić S., Vuksanović V., Ivanković M., Lanščak M. & Markić A.G. 2024: Variations in Proline Content, Polyamine Profiles, and Antioxidant Capacities among Different Provenances of European Beech (*Fagus sylvatica* L.). – *Antioxidants* 13(2): 227.

- Knoke T. 2002: Value of complete information on red heartwood formation in beech (*Fagus sylvatica*). – *Silva Fennica* 36(4): 841–851.
- Košíková B., Sláviková E. & Ka F. 2008: Biodegradability Of Extractives In Sound And Biologically Decayed Beech By Various Yeast Species. – *Wood Research* 53(3): 9–16.
- Long Q.-Q., Feng N., Gan H.-X., Zhang X., Han Y.-P. & Gu J. 2023: Study on origin traceability of amur cork-tree bark based on stable isotopes and multielements combined chemometrics. – *Industrial Crops and Products* 194: 116380.
- Magel E. & Höll W. 1993: Storage carbohydrates and adenine Nucleotides in trunks of *Fagus sylvatica* in relation to discoloured wood. – *Holzforschung* 47(1): 19–25.
- Makk Á.N., Rétfalvi T. & Hofmann T. 2017: Utilization of Oak (*Quercus petraea* (Matt.) Liebl.) Bark for Anaerobic Digested Biogas Production. – *Acta Silvatica et Lignaria Hungarica* 13: 125–134.
- Mátyás Cs. 1994: Modelling climate change effects with provenance test data. – *Tree Physiology* 14: 797–804.
- Molnár S. 2004: Faanyagismeret. – *Mezőgazdasági Szaktudás Kiadó, Budapest*, 471 pp.
- Molnár S., Németh R., Fehér S., Apostol T., Tolvaj L., Papp Gy. & Varga F. 2001: Technical and technological properties of Hungarian beech wood considering the red heart. – *Drevársky Výskum* 46(1): 21–29.
- Néčesany V. 1958: The change of parenchymatic cells vitality and the physiological base for the formation of beech heart. – *Drevársky Výskum* 3: 15–26.
- Németh K. 1997: Faanyagkémia – *Mezőgazdasági Szaktudás Kiadó, Budapest*, 123 pp.
- Nemeth R., Hill C.A.S., Takats P. & Tolvaj L. 2016: Chemical changes of wood during steaming measured by IR spectroscopy. – *Wood Material Science & Engineering* 11(2): 95–101.
- Obranović, M., Kraljić K., Škevin D., Balbino S. & Tomljanović K. 2024: Chemical Profile of Cold-Pressed Beech Nut (*Fagus sylvatica* L.) Oil. – *Nutraceuticals* 4(1): 94–103.
- Özgenç Ö., Durmaz S. & Kuştaş S. 2017: Chemical analysis of tree barks using ATR-FTIR spectroscopy and conventional techniques. – *BioResources* 12(4): 9143–9151.
- Pásztor Z., Mohácsiné I.R., Gorbacheva G. & Börcsök Z. 2016: The Utilization of Tree Bark. – *BioResources* 11: 7859–7888.
- Pirvu L., Grigore A., Bubueanu C. & Draghici E. 2013: Comparative analytical and antioxidant activity studies on a series of *Fagus sylvatica* L. leaves extracts. – *Journal of Planar Chromatography – Modern TLC* 26(3): 237–242.
- Prasad R.B.N. & Gülz P.-G. 1989: Composition of Lipids of Beech (*Fagus sylvatica* L.) Seed Oil. – *Zeitschrift für Naturforschung C* 44(9–10): 735–738.
- Puccinelli P., Anselmi N. & Bragaloni M. 1998: Peroxidases: suitable markers of air pollution in trees from urban environments. – *Chemosphere* 36(4–5): 889–894.
- Raitanen J.-E., Järvenpää E., Korpinen R., Mäkinen S., Hellström J., Kilpeläinen P., Liimatainen J., Ora A., Tupasela T. & Jyske T. 2020: Tannins of Conifer Bark as Nordic Piquancy-Sustainable Preservative and Aroma? – *Molecules* 25: 567.
- Rétfalvi T., Hofmann T., Visi-Rajczy E., Takács P., Albert L. & Markó G. 2004: The acidity of red-heartwooded beech and its effects on the mechanical features of the chipboard. – *Proceedings of the 8th European Workshop on Lignocellulosics and Pulp, Riga, Latvia*, pp. 547–550.
- Rumpf J. 1994: Bükk álgesztesedés vizsgálata a Zirci Erdészetnél. – *Kutatási jelentés, Erdészeti és Faipari Egyetem, Erdőhasználati Tanszék, Sopron*, pp. 35–56.
- Sachsse H. 1991: Kerntypen der Rotbuche. – *Forstarchiv* 62(6): 238–242.
- Salehi M., Walther L., Zimmermann S., Waldner P., Schmitt M., Schleppe P., Liechti K., Ahmadi M., Zahedi Amiri G., Brunner I. & Thimonier A. 2020: Leaf Morphological Traits and Leaf Nutrient Concentrations of European Beech Across a Water Availability Gradient in Switzerland. – *Frontiers in Forests and Global Change* 3: 19.
- Sariyildiz T. & Anderson J.M. 2005: Variation in the chemical composition of green leaves and leaf litters from three deciduous tree species growing on different soil types. – *Forest Ecology and Management* 210(1): 303–319.
- Schwarz C. 1998: Stand der Buchenrotkernforschung und Käuferansprüche an Buchenrundholz bei Auftreten von Rotkern. – *Diplomarbeit, Albert-Ludwigs Universität, Freiburg*, pp. 67–91.
- Seeling U. & Sachsse H. 1992: Abnorme Kernbildung bei Rotbuche und ihr Einfluss auf holzbiologische und holztechnologische Kenngrößen. – *Forst und Holz* 47(8): 210–217.
- Seeling U. 1991: Abnorme Kernbildung bei Rotbuche (*Fagus sylvatica* L.). – *Dissertation, G. A. Universität Göttingen*, 143 pp.
- Seeling U. 1998: Kerntypen im Holz – Konsequenzen für die Verwertung am Beispiel der Buche (*Fagus sylvatica* L.). – *Schweizerische Zeitung für Forstwesen* 149: 991–1004.
- Sies H. 1991: Oxidative stress: from basic research to clinical application. – *American Journal of Medicine* 91(3C): 31–38.

- Sutrisno, Alamsyah E.M., Syamsudin T.S., Purwasasmita B.S., Suzuki S. & Kobori H. 2020: The potential using of organic nanoparticles synthesized from Gmelina (*Gmelina arborea* Roxb.) wood bark as nanofiller of wood adhesive: physical, chemical and thermal properties. – *Journal of the Indian Academy of Wood Science* 17: 165–175.
- Tada A., Ishizuki K., Koyama A., Fukai T., Akiyama T., Yamazaki T. & Kawamura Y. 2011: Examination of original plant of mulberry bark extract, a natural food additive, based on composition of the constituents. – *Shokuhin Eiseigaku Zasshi* 52: 258–264.
- Tálos-Nebehaj E., Hofmann T. & Albert L. 2017: Seasonal changes of natural antioxidant content in the leaves of Hungarian forest trees. – *Industrial Crops and Products* 98: 53–59.
- Tănase C., Mocan A., Coșarcă S., Gavan A., Nicolescu A., Gheldiu A.M., Vodnar D.C., Muntean D.-L. & Crișan O. 2019a: Biological and Chemical Insights of Beech (*Fagus sylvatica* L.) Bark: A Source of Bioactive Compounds with Functional Properties. – *Antioxidants* 8(9): 417.
- Tănase C., Nișca A., Mirica A., Milan A. & Boz I. 2019b: Wood Bark as Valuable Raw Material for Compounds with a Bioregulator Effect in Lemon Balm (*Melissa officinalis* L.) Plants. – *Applied Sciences* 9(15): 3148.
- Tausz M., Šircelej H. & Grill D. 2004: The glutathione system as a stress marker in plant ecophysiology: is a stress-response concept valid? – *Journal of Experimental Botany* 55(404): 1955–1962.
- Titus B.D., Brown K., Helmisaari H.S., Vanguelova E., Stupak I., Evans A., Clarke N., Guidi C., Bruckman V.J., Varnagiryte-Kabasinskiene I., Armolaitis K., de Vries W., Hirai K., Kaarakka L., Hogg K. & Reece P. 2021: Sustainable Forest biomass: a review of current residue harvesting guidelines. – *Energy, Sustainability and Society* 11: 10.
- Tolvaj L., Varga D., Molnár S. & Pál A. 2001: A gőzölés színváltoztató hatása fehér és színes gesztű bükk faanyag esetében. – *Faipar* 4: 11–12.
- Tuzson J. 1903: A közönséges bükk fájának egynémely tulajdonságairól. – *Erdészeti Kísérletek* 5(1–2): 1–14.
- Varga F-né., Varga F. & Hopp T. 2006: Bükk álgeszt vizsgálatok összefoglaló értékelése a Zalaerdő Rt. Bánokszentgyörgyi Erdészeténél. – *Erdészeti Lapok* 141(4): 110–113.
- Vek V., Balzano A., Poljanšek I., Humar M. & Oven P. 2020: Improving Fungal Decay Resistance of Less Durable Sapwood by Impregnation with Scots Pine Knotwood and Black Locust Heartwood Hydrophilic Extractives with Antifungal or Antioxidant Properties. – *Forests* 11: 1024.
- Vek V., Oven P. & Humar M. 2013: Phenolic extractives of wound-associated wood of beech and their fungicidal effect. – *International Biodeterioration & Biodegradation* 77: 91–97.
- Vek V., Oven P. & Poljanšek I. 2016: Review on Lipophilic and Hydrophilic Extractives in Tissues of Common Beech. – *Drvna Industrija* 67(1): 85–96.
- Vek V., Oven P., Poljanšek I. & Ters T. 2015: Contribution to understanding the occurrence of extractives in red heart of beech. – *BioResources* 10(1): 970–985.
- Verkasalo E., Roitto M., Möttönen V., Tanner J., Kumar A., Kilpeläinen P., Sikanen L. & Ilvesniemi H. 2022: Extractives of Tree Biomass of Scots Pine (*Pinus sylvestris* L.) for Biorefining in Four Climatic Regions in Finland—Lipophilic Compounds, Stilbenes, and Lignans. – *Forests* 13: 779.
- Visiné Rajczy E. 2008: Bükk (*Fagus sylvatica* L.) extraktanyagok képződése, akkumulációja és megoszlása. – *Doktori értekezés, Nyugat-Magyarországi Egyetem, Sopron.*
- Visiné Rajczy E., Hofmann T. & Albert L. 2022: A kioldható szénhidrátok radiális és vertikális megoszlása álgeszt és álgesztmentes bükkben (*Fagus sylvatica* L.). Összefüggések a kioldható szénhidrát tartalom és az álgesztésedés között. – *Az Erdőmérnöki Kar Tudományos Kiadványa, Sopron, pp. 273–279.*
- Visi-Rajczy E., Albert L., Hofmann T., Sárdi É., Kolozsár J., Varga Sz. & Csepregi I. 2003: Storage and accumulation of nonstructural carbohydrates in trunks of *Fagus sylvatica* L. in relation to discoloured wood. – *Proceedings of the International Conference on Chemical Technology of Wood, Pulp and Paper, Bratislava, Slovak Republic, September 17–19, pp. 17–19.*
- Visi-Rajczy E., Hofmann T., Albert L. & Mátyás Cs. 2021: Tracing the acclimation of European beech (*Fagus sylvatica* L.) populations to climatic stress by analyzing the antioxidant system. – *Iforest – Biogeosciences and Forestry* 14(2): 95–103.
- Wagemann M. 2001: Vermarktungsoffensive Rotkernbuche. – *Allgemeine Forst Zeitschrift/Der Wald* 56: 1406–1407.
- Ward H.M. 1889: Beech-Wood. – *Nature* 39: 511–515.
- Wernsdörfer H. 2006: Analysing red heartwood in Beech (*Fagus sylvatica* L.) related to external tree characteristics – towards the modelling of its occurrence and shape at the individual tree level. – *Life Sciences [q-bio]. ENGREF (AgroParisTech).*
- Zang U., Goisser M., Meyer N., Häberle K.-H. & Borken W. 2021: Chemical and morphological response of beech saplings (*Fagus sylvatica* L.) to an experimental soil drought gradient. – *Forest Ecology and Management* 498: 119569.

- Zell J., Hanewinkel M. & Seeling U. 2004: Financial optimisation of target diameter harvest of European beech (*Fagus sylvatica*) considering the risk of decrease of timber quality due to red heartwood. – Forest Policy and Economics 6: 579–593.
- Zolfaghari R., Hosseini S.M. & Korori S.A.A. 2010: Relationship between peroxidase and catalase with metabolism and environmental factors in Beech (*Fagus orientalis* Lipsky) in three different elevations. – International Journal of Environmental Sciences 1: 243–252.
- Zycha H. 1948: Über die Kernbildung und verwandte Vorgänge im Holz der Rotbuche. – Forstwissenschaftliches Centralblatt 67(2): 80–109.



15.-8. ábra. Polifenolok vizsgálata HPLC-MS készülékkal (Fotó: Hofmann Eszter)