

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

1.3. A bükk és a bükkösök ökológiai sajátosságai

Erdészeti ökológiai kutatások hazai bükkösökben

Führer Ernő

Az erdészeti ökológia az erdő összetételét, növekedését, szerkezetét meghatározó alapvető feltételeket, és a feltételeket követő változásokat vizsgálja. Az erdei fafajok hosszú élettartama és a tartamos (fenntartható) erdőgazdálkodás eredményeként az erdők működésére és élettani folyamataira egy nagyrészt zárt szerves- és tápanyagforgalom jellemző. Az erdei ökoszisztéma felépítésének, éghajlati, széndioxid-megkötési, energia-, víz- és tápanyag-háztartási, valamint humuszképző és egyéb szerepének megismerése ezért az ökoszisztéma-szolgáltatások tartamos és optimális igénybevételéhez ma már elengedhetetlen. Ezen ismeretek birtokában lesz képes az erdészeti ökológia olyan alapelveket kidolgozni, melyek tudományos támpontot nyújtanak a szakszerű erdőműveléshez és fahasznosításhoz, valamint az erdők felújításához és az erdőtelepítésekhez.

Magyarország egyik legkisebb kiterjedésű élőhellyel rendelkező, de ökológiai jelentőségét tekintve kiemelkedően fontos zonális erdőtársulásai a bükkösök. Eddigi élőhelyüknek a klíma és a talaj szempontjából optimális adottságú területe jelenleg a rohamosan változó időjárási körülmények miatt egyre jobban leszűkül, mert a bükk versenyképessége csökken a többnyire szárazabb feltételekhez jobban alkalmazkodó fafajokkal szemben. A jelen főfejezet a változások nyomon követése és a várható következmények előrejelzése érdekében a hazai bükkösök ökológiájával, klímájával, energiaháztartásával, víz-, szén-, szervesanyag- és tápanyag-forgalmával, valamint növekedési tulajdonságaival kapcsolatos kutatási eredményeket mutatja be.

A társulásképeség ökofiziológiai háttere

Csiszár Ágnes

A fejezet azokat az ökofiziológiai összefüggéseket mutatja be, amelyek meghatározzák a bükk előfordulását és szerepét a hazai erdőtársulásokban. A fejezet az 1.2. főfejezet »A bükk fiziológiája – a változó klíma tükrében« alfejezetére épül, amely az itt használt élettani fogalmak, folyamatok bővebb leírását tartalmazza. Az ökofiziológiai háttér ismertetését a jelen főfejezetben tematikus alfejezetek részletezik tovább, így a »Bükköseink klímája«, »A bükkösök vízgazdálkodása és vízforgalma«, »Tápelem-készlet és -forgalom« és további alfejezetek.

Mint minden szárazföldi növény esetében, a bükk esetében is a fiziológiai tűrőképesség meghatározza a *klímaigényt*, ezen belül az évi hőmérsékleti és a csapadékmennyiség szélsőségei kiemelt jelentőségű klímaterényezők. A faj jégkorszak utáni kolonizációját is a hőmérséklet és a csapadék viszonyok tették lehetővé az elterjedési terület határain. A bükk fenofázisait is genetikailag meghatározott hőmérsékleti határok szabályozzák. A levelek és virágok védelme érdekében hosszú nyugalmi időszak, gátlást feloldó hideghatás és a fakadáshoz meghatározott hosszúságú, 5 °C feletti időszak szükséges. A csírázóképes makk esetében a csírázás gátlás (átfekvés) véd a kései fagykártól.

Hazánk kontinentális klímájában a bükk előfordulását a szűkös csapadék és a nyári aszály korlátozza, emellett a kései fagyokra is érzékeny (Salamon-Albert et al. 2016). A hosszú, hideg tél viszont, magasabb hegyvidékek hiányában, nem játszik fontos szerepet, míg a Kárpátoktól északra már alacsony tszf. magasságon is meghatározó fontosságú. A bükköt klímaérzékenysége miatt a termőhelyek mezoklímájának indikátoraként alkalmazták: a júliusi 14 órás légnedvesség átlagának 60%-nál magasabb értékét jelezte a „bükkös klíma” (Járó 1972). Az erdőleltár- és a digitális klíma-adatok geoinformatikai feldolgozása igazolta először a hazai zonális erdőövek klimatikus elhatárolhatóságát (Mátyás & Czimmer 2000). Ma már 94 hazai meteorológiai állomás 1901-től 2000-ig tartó meteorológiai mérései és az Országos Erdőállomány Adattár adatbá-

zisai alapján húzható meg a bükkös klíma szárazsági határa: ahol az erdészeti szárazsági mutató értéke (*FAI*) 4,750 vagy az alatti (Führer 2010, 2018; Führer et al. 2011b).

A bükk *vízigénye* alapján mezofil fafaj, vegetációs időszakban egyenletes vízellátást igényel. Gyökerei csak jól szellőzött talajokon működnek megfelelően, kerüli az erősen kötött vagy jelentősen többletvízhatású, levegőtlen talajokat. Általában sekélyebb gyökérzetet fejleszt, amely érzékenyvé teszi a szárazsággal szemben, bár rendszeres szárazság és megfelelő talajállapot esetén a gyökerek mélyebbre is hatolnak. A víz hidraulikus emelése a mélyebb gyökerekből a sekélyebbekbe más fajokkal, például a tölgyekkel összetvetve kevésbé hatékony (Packham et al. 2012; Leuschner 2020). A bükk törzs- és ágrendszere felépítésének köszönhetően azonban képes a csapadék összegyűjtésére és levezetésére a gyökérzet irányába, ez előnyt jelent a más fafajokkal folytatott versengés során.

Az idős fák nagy lombfelülete sokat párologtat, ezért a tartós talajbéli vízdeficitet nem viseli el. Levélterülete, és ezáltal párologtató felülete éves szinten időjárástól függően módosulhat, nyári szárazság idején a sztómareguláció révén csökkenti a vízvesztést. Aszályos körülmények között gyenge vízfellevő képessége miatt a xilém vízpotenciálja még így is tovább csökkenhet (Köcher et al. 2009; Scharnweber et al. 2011).

A klimatikus optimumában mérsékelt anizohidrikus (vízpazarló) fajként viselkedő bükk csak részben képes a párologtatás szabályozására (a sztómás vezetőképesség megváltoztatására), ezáltal csak kedvező körülmények vagy enyhe szárazság esetén képes optimalizálni asszimilációs rátáját. A bükk fényleveleinek sztómás vezetőképessége a kocsánytalan tölgyhöz képest 30%-kal, a magas kőrishez képest 40%-kal alacsonyabb (Backes & Leuschner 2000; Köcher et al. 2009). Ez a tulajdonsága súlyos aszály esetén hátrányos lehet, mert a hidraulikus rendszerben a vezetőképesség jelentős csökkenése (kavitáció) léphet fel, amit a sejtes vízvesztés fokozódása és a metabolikusan aktív levélrészek károsodása követ (Pflug et al. 2018). Az aszály stressz nemcsak az ágakat és a leveleket érinti, hanem az egész koronát, és kihat a következő évi tavaszi-nyári aszályokkal szembeni érzékenységre. A párologtatás szabályozásának gyengeségével szemben a bükk kavitáció ellenállását javítja a bükk xilém anatómiai felépítése, azaz az edények aránylag kis keresztmetszete. A bükk szárazságtűrése élettani hátterét az 1.2. fejezet »A bükk fiziológiája« alfejezete részletezi.

Fényigényének és fotoszintetikus aktivitásának köszönhetően a bükk újulat fokozottan árnytűrő, az aljnövényzetben a fényintenzitás növekedésére egy bizonyos mértékig képes kedvezően reagálni. A teljes napfény 35%-át meghaladó megvilágításnál azonban a magoncok magassági növekedése már nem fokozódik tovább. Ezért a kisebb méretű lékek, ahol a közvetlen napfény hatása rövid idejű, fontos szerepet játszanak, kedvezőbb versengési feltételeket képeznek a bükk felújulásához és növekedéséhez, mint a nagy területű beavatkozások (Tognetti et al. 2006).

A bükk levélterület indexe (*LAI*) más lombos fafajokhoz képest viszonylag magas. A levélterület és a levéltömeg az állomány korával összefüggően csökken. Meier és Leuschner (2008) szerint a csapadék mennyisége és időpontja jelentősen befolyásolja a levélterület indexet. A kifejtett fa fény- és árnyékleveleket növeszt, amelyek mind anatómiájukban, mind fiziológiai működésükben jelentősen különböznek. A sztómás vezetőképesség és a nettó fotoszintézis ráta a fénylevelek esetén kétszer akkora, mint az árnyékleveleknél (Warren et al. 2007). Az árnyéklevelek zárt állományban is hatékonyan fotoszintetizálnak, fotoszintetikus teljesítményük maximumát augusztusra érik el, amikor a fényleveleké már csökkenni kezd. Mindez a zárt, elegyes állományokban a bükknek előnyt biztosít. Súlyos szárazságstressz alatt a bükk védőfolyamatokat indukál a fotoszintetikus apparátus működőképessége fenntartása érdekében. A szárazabb klímában tenyésző bükk populációk genetikailag is képesek alkalmazkodni, nemcsak a levélméret változtatásával, hanem a vízhasznosítási hatékonyság és a sztómás vezetőképesség korrekciójával, a fotokémiai hatékonyság növelésével (lásd még az 1.2. főfejezet »A bükk fiziológiája« alfejezetét és az 1.2.-23. és 24. ábrákat).

A bükk *tápanyagfelvétele* során a nitrogént többféle módon képes felvenni, szervetlen és szerves formában egyaránt, de a nitrát és a szerves kötésben lévő nitrogénvegyületek fontosabbak a bükk számára, mint az ammónium. A bükk nitrogén felvétele negatívan korrelál a talaj mikrobiális biomasszájával, ezért korlátozott N-forrás esetén a bükkösökben intenzív kompetíció folyik a nitrogénért a bükk és a talajmikrobák között (Stoelken et al. 2010; Simon et al. 2011). A bükk nitrogénigénye az egyedfejlődés során változik, ami

az állományon belül csökkenti a fajon belüli versengést. A magoncoknak tavasszal, a kifejlett egyedeknek ősszel a legmagasabb a nitrogénigénye. A bükk nitrogénigényét más fafajokéval összevetve az alábbi sorrend állapítható meg: kocsánytalan tölgy < bükk < luc < erdeifenyő < kislevelű hárs < magas kőris (Schulz et al. 2011).

A bükk foszfátfelvételében a mikorrhiza partnereknek is nagy szerepük van. Bartlett és Lewis (1971) kimutatták, hogy az ekto- és endomikorrhízis gyökerek sokkal gyorsabban veszik fel az ortofoszfátot a talajból, mint a mikorrhiza nélküliek. A bükk szempontjából a szervetlen és szerves foszfát komplexek is fontos források; a humuszrétegben növekvő mikorrhízis bükk gyökerek olyan foszfatázokat tartalmaznak, amelyek katalizálják a talaj foszfátjainak hidrolízisét. A bükk mikorrhiza köpenyének sejtjei a vakuólumban foszfort és kalciumot tartalmaznak, de jelentős mennyiségű kalcium van jelen a gombaköpeny hifáinak falaiban is (Strullu et al. 1982). A kicserélhető kálium, kalcium és magnézium mennyiségének időbeli változását vizsgálva, Collignon és munkatársai (2011) a bükk és a lucfenyő külső és belső rizoszférájában azt tapasztalták, hogy mindkét rizoszféra régió gazdagabb a vizsgált tápanyagokban, mint a talaj. Ez arra utal, hogy a gyökérzet és a hozzájuk kapcsolódó baktériumok és mikorrhiza gombák mineralizációs folyamatok révén növelik a talaj tápanyagainak hozzáférhetőségét.

A bükk *kompetíciós* képessége szempontjából fontos, hogy plasztikusan alkalmazkodni képes a fényenergia optimális kihasználása érdekében. Leveleinek többsége a lombkoronaszint belső, többnyire középső rétegében található. Biomassza allokációját inkább a sugárirányú növekedésre fordítja, mint a magassági növekedésre, különösen alacsonyabb fényintenzitásnál. Míg a magas kőris és a hegyi juhar a nagyobb lélekben újul jobban, addig a bükk jól alkalmazkodik az erőteljes árnyaláshoz. Petriřan és munkatársai (2009) bükk, magas kőris és hegyi juhar csemeték növekedését hasonlították össze újulatban, ahol a csemetéket a lombkoronára eső fény 3–60%-a érte. Alacsonyabb fényintenzitásnál az éves növekedés tekintetében a kőris és a juhar alig előzte meg a bükköt, magasabb fényintenzitásnál viszont mindkét fénytoleráns faj csemetéi fokozatosan lehagyták a bükk magoncokat. Mindamellet a magas kőrishez és a hegyi juharhoz képest a bükknek a legnagyobb a specifikus levéltömege, az egységnyi famagasságra vonatkoztatott teljes levélterülete és a levélterület indexe (*LAI*) is.

Szélöntés által keletkezett lékek kompetícióra gyakorolt hatását Anev és Marinova (2021) bükk és madárcseresznye újulatában vizsgálták, a szélöntést követő második, ötödik és hetedik évben. A madárcseresznye a vizsgálat mindhárom évében, a bükk csupán a szélöntést követő ötödik évben mutatott pozitív fotoszintetikus választ a magasabb fényintenzításra. A madárcseresznye transzspirációja a szélöntés hatására kialakult lékekben szignifikánsan magasabb volt, míg a bükk esetén nem volt különbség a transzspirációban a viharkárt szenvedett és az érintetlen terület között. A madárcseresznye újulat vízhasznosítási hatékonysága és klorofill tartalma a szélöntés hatására nőtt, a bükké stabil maradt. Összességében a vizsgálat a cseresznye hatékonyabb fiziológiai alkalmazkodását igazolta az abiotikus hatások által okozott bolygatáshoz és az ezt követően megváltozott mikroklímatis viszonyokhoz.

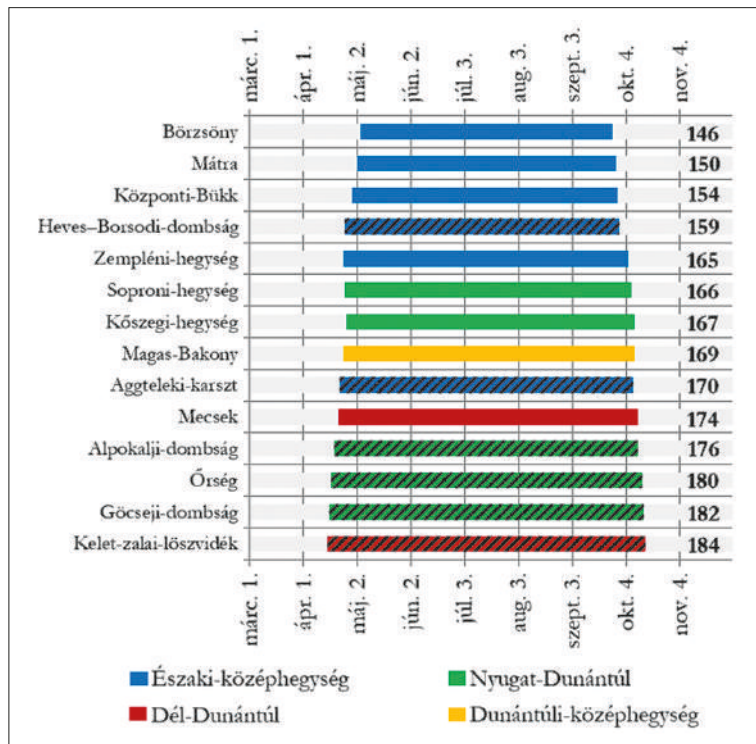
Bükköseink klímája

Führer Ernő és Jagodics Anikó

A bükk kimondottan klímaigényes és a klímától függő fafaj, elterjedése mindenhol az atlanti klímához simul, és ahol annak hatása lassan megszűnik, onnan a bükk fokozatosan elmarad. Nyugat-Európától kelet felé haladva szubkontinentális klímahatások (például késői fagy, napi maximum hőmérséklet, aszályos időszakok) korlátozzák előfordulását. Dél-Európa irányában pedig mindenütt a hegyvidék fájává válik, ugyanis a melegebb és szárazabb mediterrán klíma hatását csak a montán elhelyezkedés tudja ellensúlyozni. A bükk előfordulásának határát tehát leginkább az extrém időjárási és vízháztartási viszonyok jelölik ki (Otto 1994; Ellenberg 1996; Rennenberg et al. 2004; Rasztoivits et al. 2014; Horváth & Mátyás 2016; lásd még a 9.2. fejezetben »A bükk szárazság toleranciája« alfejezetet is). A klímát jellemző legfontosabb ökológiai elemek,

a hőmérséklet és a csapadék értékeit a felszíni formák és a domborzati viszonyok jelentősen módosítják, kialakítva ezzel a helyi körülményeknek megfelelő mezoklimát. A klimatikus viszonyok mellett azonban az időjárás szélsőségei is élettani határokat szabnak a bükk elterjedésének.

A *hő mennyisége* és eloszlása a legfontosabb életfunkciók (transzspiráció, asszimiláció és légzés) előfeltétele. Azonban kedvező voltát nem mindig lehet abszolút hőmérsékleti értékekkel kifejezni, mert a növekedés és a légzés optimális hőmérsékleti körülményei eltérnek egymástól. Ezek kiegyensúlyozott hatása a legelőnyösebb, azaz amikor az ökológiai optimum érvényesül. A szervesanyag-képzés, a vegetatív és generatív fejlődés szempontjából a legfontosabb az a *vegetációs periódus*, amelyben a fák megfelelő életműködéséhez szükséges 10 °C-os napi átlaghőmérséklet kihagyások nélkül érvényesül. Már Köppen (1889) mérésekkel igazolta, hogy e periódus a bükk esetében a lombos állapot hosszával egyezik meg, és kontinentális klímahatás alatt álló területek esetén el kell érje az öt hónapos időtartamot. Mayr (1925) pedig száz éve leírta, hogy a bükkösök előfordulásának éves hőmérsékleti optimuma 7 és 12 °C közé, a május-augusztusi periódus átlaghőmérséklete pedig 16 és 18 °C közé esik. Ha az említett feltételek nem teljesülnek, akkor a helyszín háttértermőhelynek minősül a bükk számára. Magyarországon a bükkös klímájú erdészeti tájak és tájrészletek mindegyikén a limitáló hőmérsékleti határok közötti viszonyok uralkodnak.



1.3.-1. ábra. Vegetációs időszak átlagos hossza (nap) a bükkös klímájú ($FAI_{1961-2010} < 4,75$; Führer 2018) tájakon az 1961–2010 időszakban (a dombvidék jellegű tájak vonalkézva)

a vegetációs periódus előbb kezdődik és később fejeződik be, így hosszabb a vegetációs periódus, mint a hegyvidéki (400 m tszf. magasság feletti) erdészeti tájakon. Köppen (1889) a téli hónapok hőmérsékleti viszonyait akkor tekinti kizáró feltételnek, ha a januári átlaghőmérséklet -3 °C , a februári pedig -2 °C alá süllyed, a minimumhőmérséklet pedig nem süllyed a kambiumkárosodást előidéző -35 °C alá (Dengler 1944; Rubner & Reinhold 1960; Safer 1966; Röhrig & Bartsch 1992; Tarasiuk 1992; Ebert 2003), vagyis a bükk téli hidegtűrő képessége viszonylag magas. A hőmérséklet szélsőséges értékei közül viszont a vegetációs időszakon belül jelentkező késői (április–május) fagyok azok, amelyeknek gyakori fellépte a bükk megmaradását befolyásolja, azaz a bükk késői fagyokkal szembeni ellenállóképessége alacsony.

A vegetációs periódus hossza egy táj (Börzsöny: 146 nap) kivételével meghaladja az öt hónapot (1.3.-1. ábra; 1.3.-1. táblázat). A szubatantli klímahatás alatt álló Nyugat-Dunántúl erdészeti tájcsoport tájain 1961–2010 közötti évek átlagában a vegetációs periódus április 16–26. között indul, és október 7–14. között fejeződik be, ugyanakkor a kontinentális klímahatás alatt álló Északi-középhegység tájain április 22-e és május 4-e között kezdődik, és szeptember 26-a és október 8-a között fejeződik be. Tehát a melegebb és nedvesebb, valamint kisebb hőmérsékleti kilengésekkel jellemezhető szubatantli klímahatás alatt álló nyugati országrészben a vegetációs periódus átlagban 16 nappal hosszabb, mint a hűvösebb és szárazabb, valamint nagyobb hőmérsékleti kilengésekkel jellemezhető kontinentális klímahatás alatt álló északi, északkeleti országrészben. Mindkét klímahatás esetében a dombvidéki jellegű tájakon

A csapadék a szárazságra hajló éghajlatú területeken, és ott, ahol fajok vízutánpótlásában a gyökérzet a talajvizet nem éri el, a legfontosabb ökológiai tényező. Csapadék vonatkozásában az évi átlagnak a jelentősége nagyobb, mint az évi átlaghőmérsékletnek, mivel a télen lehulló csapadék a tenyészidőszak kezdetén, ill. az alatt tartalékot képez. A száraz nyaraknak a faállományok növekedésére kifejtett hatása azért is igen jelentős, mert a szárazságra érzékeny fajok fejlődését, ill. elterjedését korlátozza. Közép-Európában a csapadék nagyságát tekintve két törvényszerűség ismerhető fel. Egyrésztől nyugatról kelet felé annak éves mennyisége fokozatosan csökken, mert a nyugati szelek nedvességüket annál nagyobb mértékben veszítik el, minél messzebb távolodnak el a tengerektől. Másrészt a csapadék éven belüli eloszlásában is érzékelhető változás. Azaz Magyarországon, amíg a szubatlanti klíma hatása alatt álló nyugat-dunántúli erdészeti tájak 50 éves (1961–2010) átlagos csapadéka 761 mm, addig a kontinentális jellegű Északi-középhegység tájain 60 mm-rel kevesebb (1.3.-1. táblázat). Az is megfigyelhető, hogy az éven belüli megoszlás tekintetében a különbség nem a nyugalmi időszak, hanem a tenyészidőszak csapadékösszegének eltérésében mutatkozik meg. Ugyanis amíg a téli hónapok csapadéka nyugatról kelet felé haladva változatlan, addig a nyári hónapoké jelentősen lecsökken. Rubner (1934) azon általánosan tett megállapítása, miszerint a téli csapadék aránya az éves csapadékon belül nyugatról kelet felé csökken, Magyarország bükkös tájaira nem jellemző. A bükkösök elterjedési területén az éves csapadék minimumértékének el kell érni az 500–550 mm-t, a május-augusztusi időszakban pedig a 250 mm-t (Mayr 1925). Magyarországon e feltételek egyértelműen teljesülnek, ahol a bükk dominál (I–XII. hó > 600 mm, V–VIII. hó > 300 mm).

1.3.-1. táblázat. A bükkös klímájú ($FAI_{1961-2010} < 4,75$; Führer 2018) tájak átlagos csapadék és hőmérséklet adatai az 1961–2010 időszakban, éves, naptári hónapok szerinti vegetációs és nyugalmi időszakokra bontva, valamint az átlagos EQ- és FAI-értékek

Erdészeti táj ill. tájcsoport	Év		Nyugalmi időszak (XI–III. hó)		Vegetációs időszak (IV–X. hó)		EQ	FAI
	csap. (mm)	hőm. (°C)	csap. (mm)	hőm. (°C)	csap. (mm)	hőm. (°C)		
48a. Göcseji-dombság	729	9,6	218	1,8	511	15,2	27,0	4,64
47. Őrség	731	9,6	213	1,8	518	15,2	26,5	4,42
44. Alpokalji-dombság	713	9,2	201	1,5	512	14,8	27,2	4,48
41. Soproni-hegység	771	8,5	220	0,8	551	14,0	23,9	4,07
43. Kőszegi-hegység	860	8,6	251	1,2	609	13,9	21,0	3,61
Nyugat-Dunántúl	761	9,1	221	1,4	540	14,6	26,4	4,43
19a. Aggteleki-karszt	678	8,5	198	0,3	480	14,4	27,7	4,42
17a. Zempléni-hegység	670	8,0	194	-0,2	476	13,7	27,0	4,39
20. Heves–Borsodi-dombság	636	7,5	182	-0,5	454	13,3	27,8	4,31
21a. Központi-Bükk	736	7,3	225	-0,6	511	12,9	23,5	3,97
22. Mátra	728	7,1	242	-0,6	486	12,6	23,2	4,11
25. Börzsöny	767	6,7	290	-1,2	477	12,3	21,5	4,43
Északi-középhegység	703	7,5	222	-0,5	481	13,2	23,3	4,21
52a. Kelet-zalai-löszvidék	789	9,8	261	2,0	528	15,4	25,2	4,66
55. Mecsek	790	8,9	268	0,8	522	14,6	24,3	4,58
32. Magas-Bakony	744	8,6	257	0,9	487	14,0	24,7	4,62
Egyéb bükkös klímájú területek	774	9,1	262	1,2	512	14,7	24,7	4,62

A csapadékon kívül a *légnedvesség* az az elem, ami a fák vízháztartását befolyásolja. Mayr (1925) szerint bükkösök ott fordulnak elő, ahol a relatív légnedvesség átlagos értéke májustól augusztusig meghaladja a 70%-ot. A légnedvesség havi átlagos értékei az atlanti klíma jellegű területeken januártól szeptemberig magasabbak, októbertől decemberig pedig alacsonyabbak, mint a kontinentális hatással érintett tájakon, a különbség májusban a legnagyobb, elérheti a 10%-ot (Rubner 1934). Tekintettel arra, hogy a levegő páratartalma kapcsolatban áll az éjjeli fagyok keletkezésével, a májusi alacsonyabb légnedvesség az éjszakai jelentős kisugárzással együtt hozzájárul a késői fagyok kialakulásához. Általában a légnedvesség időbeli alakulását a termodinamikai és cirkulációs tényezők befolyásolják. Így értékük térben és időben gyorsan változhat, ami miatt klíma-típezésre való alkalmasságuk erősen korlátozott.

A bükk elterjedési határának kijelölésére alkalmas egyszerű szárazsági mutató az Európában általánosan használatos *Ellenberg-féle index* (*EQ*, Ellenberg 1988), és a magyarországi viszonyokra kifejlesztett *erdészeti szárazsági mutató* (*FAI*, Führer 2010, 2018; Führer et al. 2011b; 1.3.-1. táblázat). Az *EQ* a legmelegebb hónap (általában T_{07}) átlaghőmérsékletének és az éves csapadéknak (P_a) a hányadosa:

$$EQ = 1000 T_{07} P_a^{-1},$$

A *FAI* pedig figyelembe veszi a szervesanyag-képzés legintenzívebb időszakának csapadékösszegét májustól júliusig (P_{05-07}), továbbá a legmelegebb, az ún. kritikus hónapok (július és augusztus) középhőmérsékletét (T_{07-08}) és csapadékösszegét (P_{07-08}), vagyis a július csapadéka kétszeres súllyal szerepel:

$$FAI = 100 T_{07-08} (P_{05-07} + P_{07-08})^{-1}.$$

Jahn (1991) szerint, a 20 alatti *EQ* értékek igazi „bükk-klímát” mutatnak; ami fölött a bükk versenyképessége csökken, és a 30 feletti *EQ*-val rendelkező régiókban eltűnik. Czúcz és munkatársai (2013) szerint a magyarországi bükkösök elterjedésének alsó szárazsági határa a 28,9-es *EQ* értéke mentén húzódik. Ezt az erdészeti szárazsági mutató is alátámasztja, ugyanis ahol a *FAI* 4,75 alatti, ott a bükk már uralkodó fafajként fordul elő, és elegendően állományokat is képez (Führer 2010, 2018).

Összefoglalva megállapítható, hogy a bükk előfordulásának optimuma olyan atlanti klímahatás alatt álló terület, amelyre az enyhe tél és a nem túl száraz nyár a jellemző. Ilinszkij (1937) szellemesen „az óceáni klíma gyermekének” nevezi a bükköt. A tipikus kontinentális éghajlatú területekről hiányzik. Európában kelet felé haladva a hosszú, kemény telek és a késői fagyok, valamint a gyakori nyári szárazságok szabnak határt elterjedésének (Czajkowski et al. 2006). Valódi előfordulását azonban a limitáló éghajlati tényezők mellett más fajok konkurenciája is befolyásolja. Elterjedési területén belül a talajadottságok nagyszámú kombinációja fordul elő, amiket a bükk igyekszik elfoglalni. Optimális klímaviszonyok között azonban a bükk olyan versenyképes, hogy előfordulása és megmaradása szempontjából a talaj nem játszik különösebb szerepet. Amennyiben a klímaigénye kevésbé érvényesül, fejlődése csak akkor lesz zavartalan, ha jó talajadottságok képesek a klíma kedvezőtlen tényezőinek hatását kompenzálni. Gyengébb adottságok mellett azonban már más, a körülményekhez jobban alkalmazkodó, versenyképesebb faj veszi át a bükk helyét. (A faj klímaigényéről lásd még a »9.2. A bükk fenotípusos és genetikai alkalmazkodása« fejezetet.)

A bükkös energiaforgalma

Vig Péter

Sugárzás- és hőforgalom

Az ökoszisztémák működéséhez szükséges energiát a napsugárzás biztosítja. A légkörre jutó 1368 W/m^2 sugárzó energia fluxus mintegy 30%-a a légrézecsékről és a felhőkről visszaverődik (a légkör albedója),

másik kb. 27% elnyelődik (abszorpció), a maradék 43% a sugárzástanilag aktív felszínre (jég, hó, víz, kőzet, talaj, növény, művi felszín) jut. Ez az aktív réteg az elnyelt rövidhullámú (fény) sugárzás hatására felmelegszik, és hosszuhullámú (hő) sugárzás formájában kisugározza energiáját a légkörbe, amelynek mintegy 88%-át az üvegházhatás folyamata során vissza is kapja. Továbbá, míg a teljes, légkörbe jutó energia 14%-a hosszuhullámú sugárzásként elhagyja a légkört, a maradék 29% képezi az ökoszisztéma hőforgalmát érzékelhető (szenzibilis) és a halmazállapot változásokban szereplő látens hő formájában. Ez az energia mozgatja a tengeri és légköri áramlásokat, és táplálja a fotoszintézist is.

A legbonyolultabb sugárzástanilag aktív felszín az erdő, mert a globálsugárzásból eredő energia a levelekben, kéregben, avarban, talajban vagy az ezekre rakódott vízben, hóban, jégben elnyelődve igen bonyolult hatásmechanizmusokat vált ki.

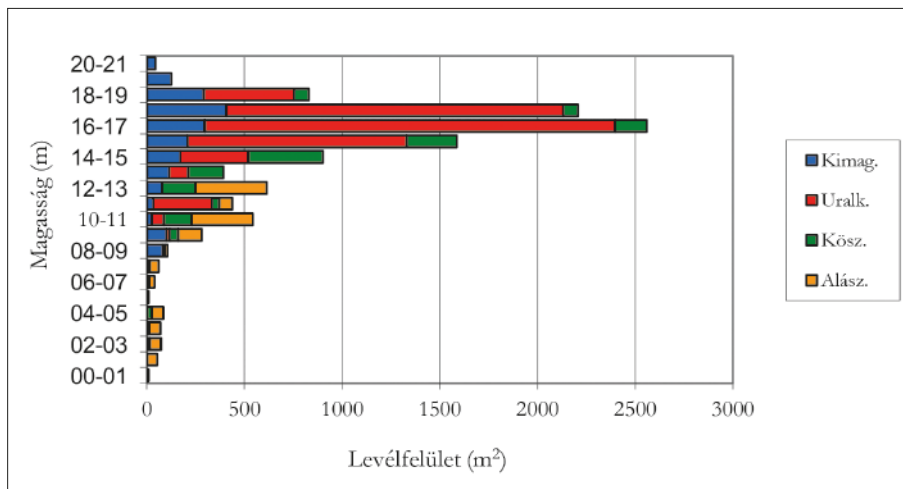
A bükkös energiaforgalmának tárgyalását érdemes a sugárzási egyenleg kialakulásával kezdeni, majd az így nyert energia hasznosulásával folytatni. Az ehhez szükséges forrásokat a Sopron 171/G erdőrészletben, egy középkorú bükkösben 1996–2012. években folyamatosan működő mikrometeorológiai mérésorozat adatai szolgáltatták, melyek tartalmazzák a koronafelszín fölötti 10 m-es magasságtól a talaj 1 m-es mélységéig a szél-, hőmérséklet-, nedvesség-profil, valamint a sugárzási egyenleg megismeréséhez szükséges adatokat.

A faállomány sugárzás-háztartása

A faállomány koronaszerkezetének megismerése érdekében, döntött mintafák részletes vizsgálata alapján készült el a levélfelület index (*LAI*) hisztogram (Bognár & Vig 2004; 1.3.-2. ábra). A hisztogram a kimagasló, az uralkodó, a közbeszorult és az alászorult egyedek koronasűrűségét ábrázolja. A mintaterület összesített *LAI* indexe 8,8 m²/m². A levél a felületére eső sugárzás egy részét reflektálja, egy részét elnyeli, a maradékot áttereszti. A reflektált sugárzás aránya a koronaszinten belül fölülről lefelé csökken, az elnyelés mértéke pedig

a koronasűrűség (az 1 m vastag szintre jutó levélfelület index) függvénye.

Az állomány sugárzásháztartási paramétereinek napi menetét mutatja be az 1.3.-3. ábra 2010. július 15-re. A hajnali napsütést 5 óra körül felhősödés zavarta meg, délelőtt derült volt az ég, 12 órától 14 óra 20 percig vastag felhőzet takarta az eget, majd újra kiderült, végül 15 óra után erős borultság hozott 20 óra 20 perctől egy órán keresztül hulló jelentős

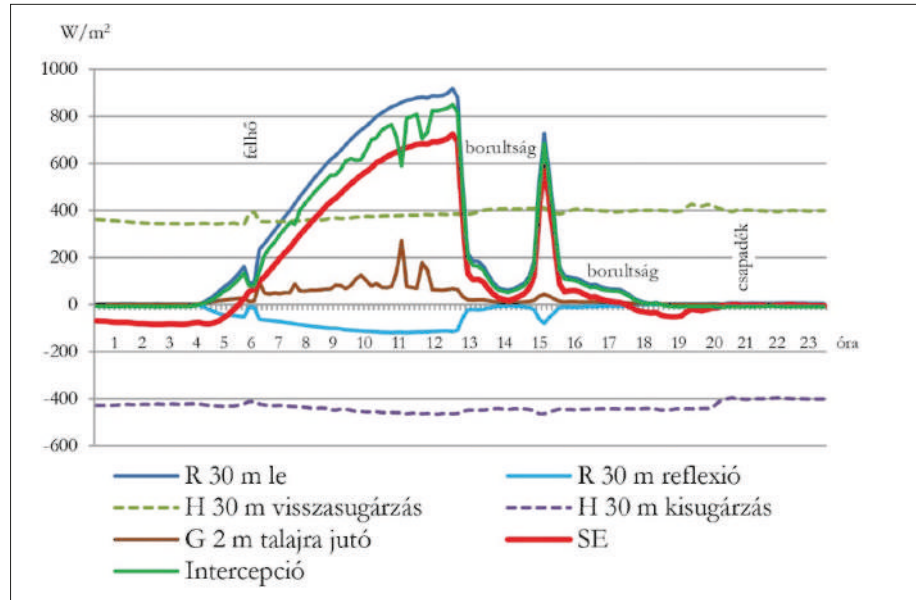


1.3.-2. ábra. A mintaterület levélfelületének eloszlása a faállomány szociológiai kategóriái szerint (Jelmagyarázat: Kimag. = kimagasló, Uralk. = uralkodó, Kösz. = közbeszorult, Alász. = alászorult)

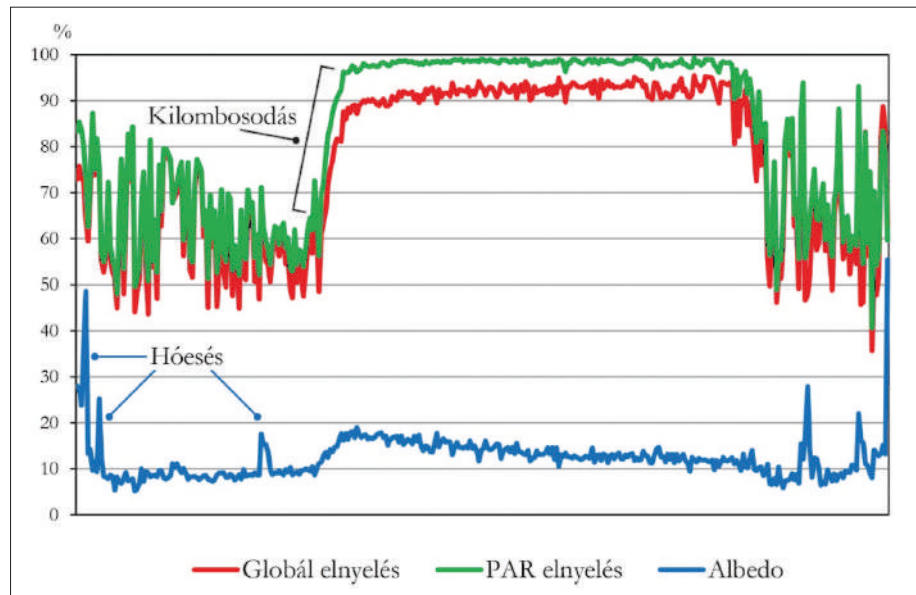
csapadékot (45,7 mm). A sugárzási egyenleg meghatározására a koronaszint fölött elhelyezett mérőeszköz négy szenzorjának adatai szolgáltak. A sötétkék vonal (R 30 m le) mutatja a beeső rövidhullámú (globál), a világoskék a visszavert rövidhullámú, a szaggatott lila a hosszuhullámú kisugárzás, a szaggatott világoszöld pedig az üvegházhatásból keletkező hosszuhullámú visszasugárzás értékeinek napi menetét. A fenti adatok egyenlegének napi menetét a piros vonal mutatja. A napi sugárzási egyenleg 12,31 MJ/m² volt. A beeső

rövidhullámú globálsugárzás összeg 19,9 MJ/m²-t tett ki, amelyből 17,4 MJ/m²-t (87%-ot) a koronaszint nyelt el (zöld vonal), 2,5 MJ/m² (13%) érte el az avart (barna vonal).

A nyári csapadékban gazdag 2010. év globálsugárzás-összege 4034 MJ/m² volt. Ebből a talajra 758 MJ/m² (19%) jutott, az aktív felszín sugárzási egyenlege 2131 MJ/m² (53%) volt. Az energiaforgalom túlnyomó része a tenyészidőszakban zajlik le: a globálsugárzás-összeg 3042 MJ/m² (75%), a talajra jutó sugárzási energia 472 MJ/m² (12%), a felszín sugárzási egyenlege 1855 MJ/m² (46%) volt. Az erdő intenzívebb tenyészidőszaki sugárzás-elnyelésére utal, hogy a beérkező energiának lombtalan állapotban 42%-a, lombos állapotban 8%-a jutott át a koronaszinten. A sugárzási intercepció és az albedo éves menetét mutatja be az 1.3.-4. ábra. Figyelemre méltó, hogy a fotoszintetikusan aktív sugárzásnak (PAR)



1.3.-3. ábra. A sugárzási paraméterek napi menete 2010. július 15-én. Az ábra magyarázata a szövegben



1.3.-4. ábra. A sugárzási intercepció és az albedo éves menete 2008-ban

mintegy 98%-át elnyeli a lombzat. A kilombosodás során a levelek világos színe miatt az albedo (az ábrán kék színben) emelkedik, majd a lombzat sötétedésével csökken.

A fállomány hőháztartása

Lombtalan állapotban a 11% albedóval csökkentett globálsugárzási energia 64%-át a fák kültakarója, 36%-át az avar nyeli el, amelynek túlnyomó része a felszín hőmérsékletét növeli, elenyésző része evaporációt vált ki. Nyugalmi időszakban az erdő az egyéb felszíni formáknál jobban melegíti a légkört, mert az avar hőszigetelő képessége miatt a talaj mélyebb rétegei nem melegsenek fel hővezetés útján, a koronaszint által felfogott hó pedig könnyen elolvad, így az elnyelt sugárzási energiával többnyire a felszínnel érintkező

levegőt melegíti fel. Ebben az időszakban a sugárzástanilag aktív felszín vastagsága megegyezik az állomány magasságával.

Lombos állapotban a 14% albedóval csökkentett globálsugárzás 92%-át a koronaszint nyeli el. Ennek egy részét a fotoszintézis emésztí fel, jelentős hányada evapotranszpiráció útján hasznosul, a maradék a levél-felszínnel érintkező levegőt fűti. A gyepszint vagy avar a maradék 8%-ot hasznosíthatja. A talaj hőforgalma ebben az időszakban is igen korlátozott. Az aktív felszín a koronaszint. A besugárzás hatására ez melegszik fel, a kisugárzástól ez hűl le legintenzívebben. Ezáltal a koronafelszín magasságában a legnagyobb a napi hőmérsékleti ingás.

A sugárzási egyenleg hasznosulása

A sugárzástanilag aktív felszín a sugárzási egyenlegből (*SE*) származó energia hasznosulási formái: a tényleges evapotranszpiráció (*TET*) látens hőigénye, a levegő hőforgalma (szenzibilis hő), a növényzet által – főleg fotoszintézisre – felhasznált energia, valamint a talaj hőforgalma. A látens és szenzibilis hőáram a különböző magasságokban 10 percenként mért páratartalom és hőmérséklet adatok felhasználásával számítható. A humiditás aktuális mértékét a Bowen-arány mutatja meg, amely a szenzibilis és látens hő hányadosaként fejezhető ki (Bowen 1926). Az év során megtermelt biomassza-produktum előállítására és a légzés energiaigényének kiszolgálására az erdő teljes tenyészidőszak alatt kifejtett fotoszintetikus aktivitása során elnyelt energia szolgál. A talaj hőforgalma az árnyékoltság és avar hőszigetelő képességének hatására elenyészőnek tekinthető.

Hőáramok

Az energia-áramlás napi megoszlására egy jellegzetes, zavartalan nyári napot (2010. július 21.) mutatunk be, amikor $28,347 \text{ W/m}^2$ sugárzás mellett a hőáramok a következőképpen alakultak: a szenzibilis hőáram $6,300 \text{ W/m}^2$ (22%), a látens hőáram $20,730 \text{ W/m}^2$ (73%) volt, a fennmaradó 5%-ot nagyjából a fotoszintézis „fogyasztotta el”. A kétféle hőáram hányadosaként képzett Bowen-arány (0,30) arányilag kedvező, humid viszonyokra utal.

Az energiaforgalom havi értékeinek megoszlása 2007. június hónapban a következő volt: globálsugárzás összeg: 598 MJ/m^2 , a sugárzási egyenleg $357,7 \text{ MJ/m}^2$, a szenzibilis hőáram $83,8 \text{ MJ/m}^2$, a látens hőáram $219,0 \text{ MJ/m}^2$, a Bowen-arány 0,38. A látens hőáram $87,6 \text{ mm}$ csapadék elpárologtatásával egyenértékű, ami $57,2 \text{ mm}$ -rel több a lehullott $30,4 \text{ mm}$ havi csapadékösszegnél. A hiányzó vízmennyiséget a talajban hozzáférhető (diszponibilis) vízkészletből nyerte a faállomány. Erős besugárzás és csapadékhiány esetén a holtvíz tartalmat közelítő, alacsony diszponibilis vízkészlet mellett a talajkolloidok vízre gyakorolt szívóereje (mátrixpotenciálja) oly mértékben növekszik, ami már nehezíti a gyökerek vízfelvételét (Vig 2009). A transzspiráció fékeződése olyan öngerjesztő folyamatot erősíthet, amelynek során a Bowen-arány tovább nő, és a sugárzási egyenleg egyre nagyobb hányada alakulhat át szenzibilis hővé (lásd az 1.3.-2. táblázatban a 2007. IV–VII. havi adatokat). A sugárzási egyenlegből (*SE*) hiányzó $54,9 \text{ MJ/m}^2$ energiának (a június havi globálsugárzás összegének 9,2%-a) kb. kétharmadát a fotoszintézis, egyharmadát a talaj felmelegedése emésztette föl.

A faállományok életkörülményeinek vizsgálatát tenyészidőszaki léptékben érdemes értékelni. A vizsgált időszak csapadékban meglehetősen gazdag volt, ezért a kezdetben negatív vízmérlegű 2007. év tenyészidőszaki adatait hasonlíthatjuk össze a jelentős csapadékbősséggel jellemezhető 2010. évével. Az előbbit az 1.3.-2. táblázat, az utóbbit az 1.3.-3. táblázat mutatja be.

1.3.-2. táblázat. A száraz 2007. év tenyészidőszaki energiamérlegének havi összesített adatai

2007	SE (MJ/m ²)	Szenzibilis hő (MJ/m ²)	Látens hő (MJ/m ²)	TET (mm)	P (mm)	Elyelt hő (MJ/m ²)	Bowen- arány	P-TET (mm)
IV.	298,27	98,83	98,65	39,5	0,2	100,79	1,00	-39,3
V.	359,75	52,36	233,44	93,4	95,6	73,95	0,22	2,2
VI.	357,74	83,84	219,02	87,6	30,4	54,88	0,38	-57,2
VII.	364,65	123,63	213,66	85,4	74,5	27,36	0,58	-10,9
VIII.	337,48	95,00	224,37	89,7	100,1	18,11	0,42	10,4
IX.	163,43	64,45	162,99	65,2	203,8	-64,01	0,40	138,6
Összesen	1881,32	518,11	1152,13	460,8	504,6	211,08		43,8

SE = sugárzási egyenleg

TET = tényleges evapotranszpiráció (Vig 2004)

P = csapadék

1.3.-3. táblázat. A csapadékos 2010. év tenyészidőszaki energiamérlegének havi összesített adatai

2010	SE (MJ/m ²)	Szenzibilis hő (MJ/m ²)	Látens hő (MJ/m ²)	TET (mm)	P (mm)	Elyelt hő (MJ/m ²)	Bowen- arány	P-TET (mm)
IV.	278,5	97,1	83,2	33,3	56,5	98,3	1,17	23,2
V.	262,50	37,08	102,03	40,8	154,9	105,6	0,36	114,1
VI.	373,03	86,24	248,53	99,4	125,9	38,3	0,35	26,5
VII.	446,48	131,15	292,25	116,9	90,4	23,1	0,45	-26,5
VIII.	311,27	19,67	211,07	84,4	158,4	80,5	0,09	74,0
IX.	201,38	58,56	155,15	62,1	82,5	-12,3	0,38	20,4
Összesen	1873,19	429,80	1092,19	436,9	668,6	333,5		231,7

A fotoszintézis során elnyelt energia

2002-ben és 2010-ben elvégzett teljes fatérfgogat felvétel, a ledöntött kimagasló, uralkodó, közbeszorult és alászorult mintafák teljes törzselemzése, minden ötödik egyedből vett növedékcsoportok elemzése alapján számítottuk a 2006–2010. évek folyónövedékét. Értéke összecseng Kollár (2022) adataival. Fühler (2002) fatérfgogat-dendromassza átszámítási módszerének alkalmazásával az utolsó öt év fotoszintetikus tevékenysége során előállított, és az ökoszisztéma további energianyero folyamatainak (fogyasztás, lebontás) eredményeként megmaradt szervesanyag mennyisége és energia tartalma így összehasonlíthatóvá vált az időszak sugárzási paramétereivel. A fotoszintézis tenyészidőszakra vonatkoztatott efficiencia (hatásfok) értékeit az 1.3.-4. táblázat tartalmazza. A táblázat adatai összecsengenek a szakirodalomban olvasható értékekkel, miszerint a tenyészidőszaki globálsugárzás összegnek 0,73%-a, a sugárzási egyenlegnek 1,25%-a marad átlagosan szervesanyag formájában megkötve az erdőben. A bükkös efficiencia értékei alacsonyabbak a szántóföldi kultúrákra jellemzőknél (búza: 2,6%, burgonya: 2,3%), ahol a természetes táplálékláncot az emberi beavatkozás megszakítja. Ez azonban nem azt jelenti, hogy a fotoszintézis a sugárzási energiának csupán ekkora hányadát veszi igénybe az ökoszisztéma szervesanyag-bázisának az előállításához. Jones (2014) szerint a C3 fotoszintézis egyes lépéseinek halmozott hatásfoka a globálsugárzásra nézve maximum 4,6%-nak tekinthető és a PAR a globálsugárzás energiájának 48,7%-át teszi ki. A vizsgált bükkösben ez az arány csupán 43,8%. Ennek figyelembevételével a bükkös a vizsgált időszakban a tenyészidőszaki globálsugárzás összegnek átlagosan

gosan 3,3%-át, mintegy 105 MJ/m²-t nyelt el fotoszintézisre. A fotoszintézis által elnyelt energiának a PAR és globálsugárzás alapján számított értékeinek éves átlaga szinte megegyezik, a globálsugárzásból számított adatok viszont nagyobb variabilitást mutatnak (1.3.-4. táblázat).

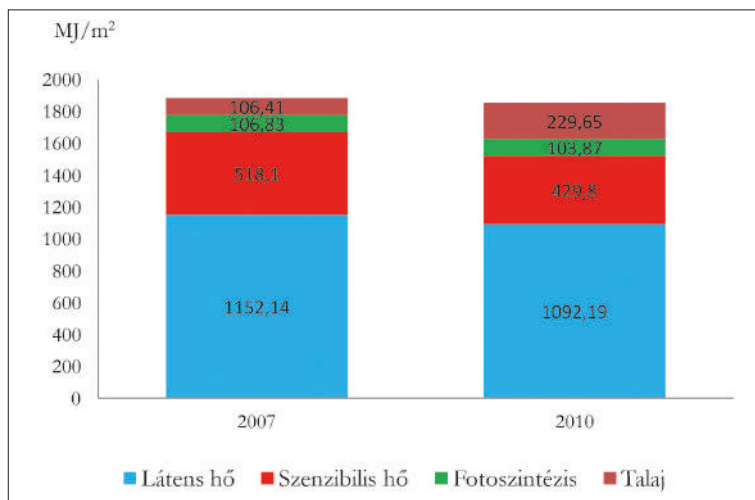
1.3.-4. táblázat. A fotoszintézis során szervesanyagban megkötött energia évenkénti értéke és a sugárzásháztartási komponensekre számított efficienciája

Év	F.növ. (m ³ /ha)	F.növ. (kg/ha)	Száraz anyag (kg/ha)	Energia (MJ/ ha)	Energia (MJ/ m ²)	T.i. glob. sug. (MJ/m ²)	Eff. glob. sug. (%)	T.i. PAR (MJ/m ²)	Eff. PAR (%)	Fot./ glob. (MJ/m ²)	Fot./ PAR (MJ/m ²)
2006	13,04	13171,9	11544,2	209873	20,99	3298,3	0,64	1444,8	1,45	107,19	107,35
2007	12,68	12813,2	11273,57	204953	20,5	3414,9	0,60	1437,8	1,43	110,98	106,83
2008	15,5	15645	13448,43	244492	24,45	3181,7	0,77	1375,3	1,78	103,41	102,18
2009	17,11	17296,7	14741,43	267999	26,8	3142,4	0,85	1388,7	1,93	102,13	103,18
2010	15,49	15639,3	13445,97	244447	24,44	3042,1	0,80	1397,6	1,75	98,87	103,84
Átlag	14,76	14913,2	12890,72	234353	23,44	3215,9	0,73	1408,8	1,67	104,52	104,68

F.növ. = folyónövedék; T.i. = tenyészidőszaki; Eff. = effektív; Fot. = fotoszintézis; glob.sug. = globálsugárzás

Összegzés

A Nap sugárzási áramának a Föld légkörén átjutó energiája az erdő jelentős magassági kiterjedésű, sugárzástanilag aktív felszínét elérve, dinamikusan változó fizikai, kémiai és biológiai folyamatok során hasznosul. A vizsgált középkorú bükkösben a faállomány döntő szerepet kap a sugárzási egyenleg kialakításában. Lombtalan állapotban a fakoronák és a talaj sötét színe, a tenyészidőszak során a levélzet zöld színe eredményez alacsony albedót. A 8,8 m²/m² levélterület indexnek (*LAI*) köszönhetően a lombkorona a gyökérzónában rendelkezésre álló diszponibilis vízkészlet felhasználásával a látens hőáram mértékét növeli, de figyelemre méltó a fotoszintézis által elnyelt energia mértéke is. Így a szenzibilis hőáram mértéke a tenyészidőszak során jelentősen csökken. A látens és szenzibilis hőáram monitorozásával, a fotoszintézis által elnyelt energia becslésével elkészíthető az erdő éves energia mérlege (1.3.-5. ábra). 2007-ben a tavaszi csapadékhiány és a magasabb globálsugárzás összeg a szenzibilis hőáram mértékét növelte, az évi folyónövedék képzését mérsékelte, a látens hő éves kibocsátását viszont a későbbi csapadékbőség kiegyenlítette. 2010-ben a kedvezőbb tavaszi vízellátottság és a koronaszint által elnyelt több sugárzási energia az évgyűrű korai pásztajának képzését jobban segítette. A fotoszintézis által megkötött energia a szenzibilis hőáramot csökkentette, a csapadékbőség hatására a nedvesebb avar és talaj hóháztartása intenzívebb lett.



1.3.-5. ábra. A bükkös sugárzási egyenlegének felhasználása száraz (2007) és csapadékos (2010) évben

A felszín-légkör energiaforgalmából a fotoszintézis által kivont energia túlnyomó része nem épül be az öko-

szisztéma szervesanyag készletébe, hanem felemésztik a biokémiai folyamatok, vagy az élelmi lánc tápanyagforgalma által hasznosul. Ezzel az erdő a felszín közeli légréteg hőmérsékletének csökkentésével hatékonyabban mérsékli a globális fölmelegedést, mint a szén-dioxid mérlegre kifejtett hatása révén.

A bükkösök vízgazdálkodása és vízforgalma

Gribovszki Zoltán, Führer Ernő, Kalicz Péter, Vig Péter, Zagyvainé Kiss Katalin és Herceg András

A bükkösök vízmérlegének bevételi eleme, a fajafaj klímazonális elterjedéséből és jellegzetességeiből eredően, szinte kizárólag a csapadék. A csapadékból a koronaszintben maradó és a csapadékesemény alatt és közvetlenül utána a légkörbe visszapárolgó vízmennyiség, vagyis a korona-intercepció, az éves csapadéknak megközelítőleg 30–35%-a. Egy tölgyes 20–25%-os intercepciójához képest ez jelentősebb tétel a bükk sűrűbb koronája miatt, viszont a fenyők hozzávetőlegesen 30–40%-os intercepcióvesztésével összevethető Járó (1980), Führer (1984, 1992, 1994a), Kucsara (1998), valamint Bolla és munkatársai (2024) adatai szerint.

Csapadék kategóriánként elemezve, míg egy 0–2 mm-es kicsapadék szinte teljes egészében intercepcióvesztésként jelenik meg, addig a nagyobb csapadékokból egyre csökkenő arányban részesül; pl. egy 30 mm-nyi csapadékból csak kb. 5–10 mm az intercepció. Így árvízvédelmi szempontból a hatékony csapadék mennyiségének csökkentésében az intercepciónak kisebb a jelentősége, viszont vízkészlet-gazdálkodási szempontból igen nagy fontosságú tétel egy bükkös vízmérlegében.

A csapadék megtapadására rendelkezésre álló felület télen, a lombozat hiányában, lényegesen kisebb, viszont az alacsonyabb hőmérséklet miatti viszkozitás-növekedés következtében, az ágakon és a törzsön megtapadó vízfilm vastagabb lehet, és a csapadékok is jellemzően kisebb intenzitásúak télen. Előbbiek miatt a



1.3.-6. ábra. Lefolyás a bükk törzsén
(Fotó: Zagyvainé Kiss Katalin)

téli intercepció mennyisége, bár alatta marad a nyárinak (Führer 1992), de közel sem annyival, mint amennyit a lombkorona felületcsökkenése jelent. A bükkösök élőhelyein alkalmanként előforduló ködös/párás időben a levegőből kiszűrt nedvesség az ágakról lecsöpögve, azokon lefolyva többlet vízbevitelként ún. „negatív intercepcióként” (intercepcióvesztésként) is jelentkezhet (különösen hó, durva szemcsés zúzmara és ónos eső esetében), ennek pontos mértéke azonban a hazai erdőkre nem ismert.

Záródott állományban a bükk koronája sudaras, ágai felfelé irányulnak, így az ágakra jutó csapadékvíz jelentős részét a törzsre vezeti (1.3.-6. ábra). A bükk sima kérge kisebb víztároló kapacitású, ami növeli a törzsi lefolyás mértékét (Levia & Herwitz 2005). Az állományi csapadékból (amely az áthulló és a törzsön lefolyó csapadék összege) a törzsi lefolyás részaránya a bükk esetében a hazai fajok közül az egyik legjelentősebb. Egy bükkösben a törzsön lefolyó vízmennyiség a csapadék kb. 10–16%-a, míg egy lucos esetében ez csak 2–3% közötti (Kucsara 1996). A különbség magyarázata, hogy a luc esetében az ág- és tűlevél szerkezet nem a törzs, hanem a korona szélei felé vezeti a koronára hulló csapadékvizet. Führer (1994a) mérései szerint egy soproni, 90 éves bükkösben 40 mm-es szabadtéri csapadék

mellett egy-egy bükk törzsön átlagban 200 liter víz is lefolyik. Délnyugat-németországi adatok szerint, humidabb klímában a bükkösök törzsi lefolyása az éves csapadék 15–18%-át teszi ki (Peck 2004). Levia és Frost (2003) szerint lombtalan időszakban a törzsi lefolyás általában nagyobb, mint lombos időszakban, bár ezt Führer (1994a) hazai mérései nem igazolták vissza.

Metzger és munkatársai (2021) a németországi Hainich Nemzeti Park bükkösét vizsgálva megállapították, hogy a törzsi lefolyás a csapadékesemény és a fák átmérőjével emelkedett. Mivel a mellmagassági átmérő összefügg a korona átmérőjével, ill. térfogatával, annak vízfelfogó, ill. vízösszegyűjtő képességét is meghatározza (Führer 1994a). Európai szinten is a bükk az egyik legalacsonyabb törzsi lefolyás képződési küszöböt és a legmagasabb törzsi lefolyási arányt mutatja (Carlyle-Moses & Schooling 2015). Hazai viszonyok között bükkösökben a törzsi lefolyás 2–3 mm-es csapadék mellett indul el. A törzsi lefolyásnak a vízellátás befolyásolása mellett a lemosódó tápelemek törzsközeli koncentráálásában is kimutatható szerepe van (lásd ugyanabban a főfejezetben a »Tápelem-készlet és -forgalom« alfejezetet is).

A bükkösökben (a lucfenyővel ellentétben) a törzsi lefolyás és a gyökerek által előidézett preferenciális áramlás a talajmátrix nagy részét megkerülő, gyors, oldalirányú, felszín alatti áramlást idézhet elő, a gyökérágak körül kialakuló, fokozatosan bővülő rések mentén; a fa így hatékonyan öntözi magát. Ennek következtében a bükkös erdőársulásokban a mélyebb talajrétegek is viszonylag gyorsabb és jelentősebb vízbevételi lehetőséggel rendelkeznek, fokozva ezzel a felszínközeli lefolyás és a mélybeszivárgás lehetőségét is (Schwärzel et al. 2012).

A klímaváltozás hatására a jövőben a csapadék egy-egy nagyobb esőben koncentrálódva valószínűleg csökkenti majd az intercepciós veszteséget. Terepi mérések és klímamodellek adatai alapján egy Sopron környéki bükkös koronaintercepciós vesztesége 30%-ról 27–28%-ra csökkenhet majd a 21. század végére Kalicz és munkatársai (2017) vizsgálatai szerint.

Hidrológiai szempontból a koronán áthulló és a törzsön lefolyó víz részben az avar benedvesedésére fordítódik, és avar-intercepcióként csökkenti a talajba szivárgó vizet. A bükk alomja bár vékony, de igen kemény, jelentős kvasav-tartalommal, mely nehezen fogyasztható az avarlakó állatok számára, és így vastag avartakaró halmozódhat fel (1.3.-7. ábra). Varga (1962) megállapította, hogy az avar bomlási folyamatokért felelős mikrofaunája viszont csak akkor aktív, amikor az alomréteget kapilláris vagy adhéziós víz nedvesíti át.

Az egyes alomnemek abban is meghatározóak, hogy az egymáson fekvő rétegek az üregképzésükkel a víztartást vagy a vízelvezetést mennyire segítik. A bükk vízszintesen fekvő leveleivel nagyobb hajszáledényeket képez, lassabban szivárog el a csapadék, mint például a fenyők esetében. Ijjász (1936) a bükk nyersalom takarója által megkötött vízmennyiség értékét vastagsági cm-ként 3,7 l/m²-ben határozta meg. Megfigyelései alapján az alomtakaró rétegei (alom, moder, érett televényréteg) által megkötött vízmennyiség arányszáma a bükkalomnál 1:30:33. Führer (1994a) bükkösben végzett vizsgálatai szerint az avarintercepció nagysága az 1988–1992-es évek átlagában a szabadtéri csapadékhoz



1.3.-7. ábra. A bükkös avarszintje (fentről és metszetben) (Fotó: Zagyvainé Kiss Katalin)

viszonyítva télen, a tárolási szakaszban (XI–IV. hónapban) 15%, a fő felhasználási szakaszban (V–VII. hónapban) 13%. Ebben a vizsgálatban nemcsak a lehullott és részben bomlásnak indult levelek képezték a vizsgálat tárgyát, hanem az 1–3 cm-es humuszosodott szervesanyag szint is. Ugyanakkor egy kocsánytalan tölgyesben 5–7% körül határozták meg az avar-intercepció értékét (Zagyvainé et al. 2014). Az erdei avar vízraktározási kapacitása közel arányosnak vehető az összegyűlt avar tömegével és kevésbé függ a fafajtól (Putuhena & Cordery 1996; Zagyvainé et al. 2013).

Az avar intercepciója azonban nemcsak veszteségként jelentkezik, hanem talajtakaróként a talajpárolgást csökkenti. Másrészt az avartakaró magas porozitásával a beszivárogtatási kapacitást jelentősen növeli és így a felszíni lefolyást felszínközeli lefolyássá transzformálja. Eróziógátló hatása részben az előbbi beszivárogtató és csapadékszétosztó hatása miatt jelentkezik, ugyanakkor fontos szerepe még a talajfelszín védelme a csapadék kinetikai ütőhatásától is.

A bükk kiterjedt gyökérrendszere lehetővé teszi azon vízforrások kiaknázását, amelyek a sekély gyökérzetű vegetáció számára nem elérhetőek (lásd még ugyanebben a főfejezetben »A finomgyökérzet és a fizikai talajféleség kapcsolata« alfejezetet). A bükk a jól szellőzött talajokat kedveli, mert gyökerei ilyen körülmények között hatékonyabban tudják felvenni a talajszemcsékhez kötött vízmennyiséget.

Az erdőtalajba szivárgó víz jelentős része a talajnedvességhez járul hozzá. E vízmennyiség a bükkösök esetében a transzspiráció szinte kizárólagos forrása, hiszen a bükk általában nem használ fel párologtatásához talajvizet. A bükkösökre megállapított transzspirációs értékek szóródása jelentős, de a különböző módszerekkel meghatározott párologtatási értékek összevethetőek. A szervesanyag produkció alapján Járó (1981) szerint a bükkösök transzspirációja 188 mm/év-re tehető, míg Csáki (2020) adatai szerint a hazai bükkerdők transzspirációja 240–480 mm/év tartományban jellemző. Csapadékosabb atlanti klímában egy németalföldi bükkös párologtatása átlagosan 360 mm/év-nek adódott (Verstraeten et al. 2005), de Vig (2002) egy soproni-hegységi bükkösben 1996-ban a 898 mm tenyészidőszaki csapadékból 469 mm faállományi transzspirációs vízfogyasztást mért. Viszont 1997-ben, feleannyi (450 mm) tenyészidőszaki csapadékösszeg ellenére, 484 mm volt a faállomány transzspirációja a fokozott párologtatási kényszer hatására. Az erdőállomány a többlet vízigényt a gyökérzóna hozzáférhető (diszponibilis) vízkészletének szinte teljes kiaknázása útján pótolta.

Más fafajokkal összehasonlítva Járó (1981) szerint a párásabb klímában tenyésző erdők, mint a bükkös, vízfelhasználása kevesebb, mint a szárazabb termőhelyeken tenyészőké (kocsányos tölgyes, hazai nyáras). Novosadová és munkatársai (2023) Csehországban elegyetlen bükkös és bükkös-tölgyes-hársas állományok vízháztartását hasonlították össze. A transzspiráció az elegyetlen bükkösben a talajfelszín elérő csapadék kb. 70%-át tette ki, de elegyes állományban ez az arány magasabb volt (71–100%). Az eltérő transzspirációs arányok oka a gyökérrendszer típus, a sztómaszabályzás és a levélterület különbségei voltak. A bükknek a talaj víztartalmát és a párányomáshiányt kezelő élettani stratégiáját részletesen ismerteti az 1.2. fejezetben »A bükk fiziológiája« alfejezet.

A bükkösök komplex vízmérlegére és a bükkösökből elfolyó vizekre vonatkozóan kevés hazai adat van. Egy Soproni-hegységben kialakított mintaterületen (1.3.-8. ábra) Vig (2002) szerint az 1996/97-es hidrológiai évben a bükkös vízmérlege a követke-



1.3.-8. ábra. Intercepció és állományklíma mérés a Soproni-hegység Új-Hermes melletti bükkösében (Fotó: Gribovszki Zoltán)

zöképpen alakult: az éves evapotranszspiráció 719 mm volt, amelyből 71% volt a transzspiráció és 29% a lombkorona-, illetve az avar-intercepció. Az adott csapadékviszonyok mellett a felszíni/felszínközeli lefolyás minimális volt (3–4%), és a mélybeszivárgás, amely a talajvíz-utánpótlódást szolgálja, sem volt meghatározó (kb. 4%).

Bár a vizsgált soproni bükkösről konkrét lefolyási adatok nem álltak rendelkezésre, viszont arról a kisvízgyűjtőről igen, ahol a bükkös található. A 2000-es év hidrológiai adatait feldolgozva megállapítható, hogy a teljes egészében erdősült kisvízgyűjtőn az éves lefolyási arány 10% körüli, és a felszíni/felszínközeli lefolyás aránya ebből szintén 10%, így az árhullámok víztömege a területre hulló éves csapadéknak kb. 1%-a (Gribovski et al. 2006). Ez az 1% azonban jellemzően nem a záródott erdőterületről, hanem a burkolt- vagy földutakról és a rakodók területéről származik. (lásd még 3.1. fejezetben »A bükkösök hidrológiai adottságai« alfejezetet is.)

Az éven belüli növekedés szakaszai és az időjárás szerepe

Führer Ernő és Jagodics Anikó

A klímaváltozással kapcsolatos előrejelzések szerint Magyarország időjárása az eddigieknél melegebb és szárazabb lesz, ezért a faállományok növekedési feltételeinek minél alaposabb feltárása a klímaváltozás ökológiai és ökonómiai következményei és az erdők klímavédelmi szerepe miatt is egyre inkább előtérbe került (Führer 1995; Manninger 2004; Szabados 2004, 2006; Somogyi 2008b, 2009; Solymos 2009; Manninger et al. 2011; Führer et al. 2013; Horváth & Mátyás 2014; Illés & Fonyó 2016; Führer et al. 2016a, b; Mátyás 1996, 2018).

1985 és 2007 között, 22 éven át (1998 kivételével) egy idős, 2008-ban 108 évesen letermelt bükkös faállományban, a törzsekre mellmagasságban felszerelt Liming-szalagok (Liming 1957) segítségével hetenként kerületnövekedés-méréseket végeztek a Soproni-hegységben (Führer et al. 2016a, b). A vizsgált erdőtípus *Oxalis acetosella*-bükkös volt, délkeleti kitettségű, enyhe lejtésű hegyoldalon, kb. 400 m tengerszintfeletti magasságban. A talajképző kőzet gneisz, az azon kialakult genetikai talajtípus pedig egy mély termőrétegű agyagbemosódásos barna erdőtalaj podzolos változata. Az átlagos faállomány-viszonyokra jellemző helyen egy 50×50 m-es parcellán megmérték valamennyi törzs magasságát és mellmagassági átmérőjét. Az állomány jó növekedésű (II. fto.) volt, hektáronkénti törzsszáma 362 db, élőfakészlete 732 m³, átlagos átmérője és magassága pedig 37 cm, ill. 32 m.

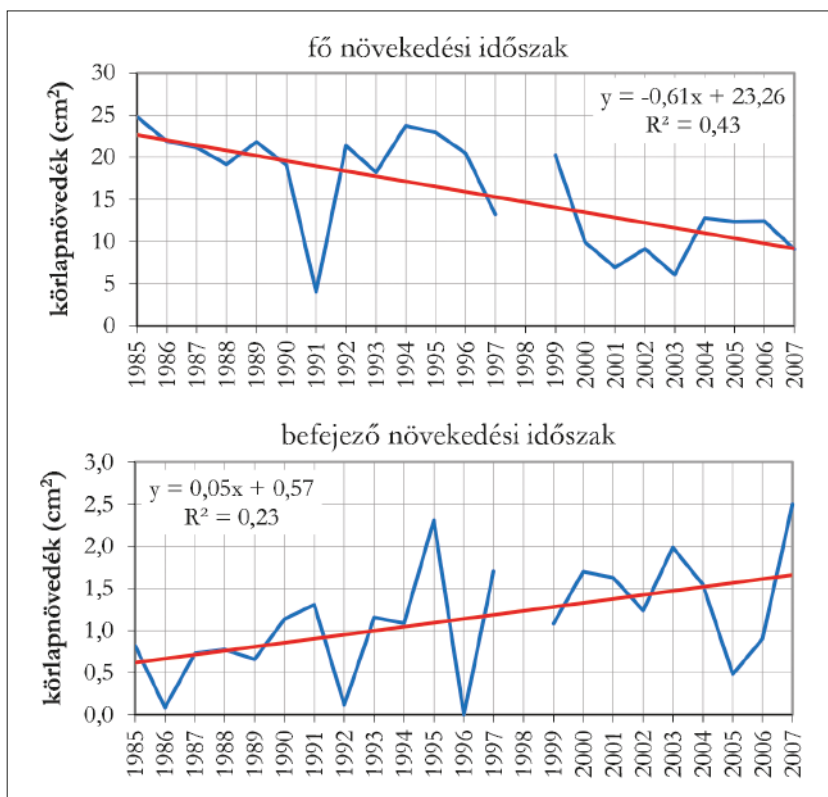
A törzsenkénti felvételekből megállapított állományszerkezetnek megfelelően kiválasztottak 4 uralkodó és 3 kimagasló szociális helyzetű törzset. Az alszorult helyzetű törzseket kihagyták az értékelésből, hiszen azoknál a növekedést az időjáráson kívül a szociális helyzetük is nagymértékben befolyásolja. Rögzítették a teljes vegetációs periódus (április–október) alatti növekedést. Továbbá a rendelkezésre álló havi meteorológiai adatokhoz illesztve, a havonkénti növekedés mellett olyan periódusokat is elemeztek, melyek lefedik a kezdeti (április), a fő (május–augusztus) és a befejező (szeptember–október) növekedési szakaszokat. Ezen időszakokat egy speciális keretrendszer, az ún. CReMIT alkalmazásával (Edelényi et al. 2011; Pödör et al. 2014) értékelték.

A mérések alapján a heti kerület-változásokból kiszámított évenkénti és fánkénti körlapnövedékek átlaga 17,9 cm² (évyűrűszélességben: 1,56 mm), a legnagyobb növekedésű, kimagasló szociális helyzetű fánál ennek értéke 31,3 cm² (évyűrűszélességben: 2,60 mm), a legkisebb növekedésű, de még uralkodó szociális helyzetűnél pedig 5,52 cm² (évyűrűszélességben: 0,56 mm). Az átmérő-növekedés a soproni helyszínen április első felében kezdődött, és október közepéig befejeződött. A 22 év átlagában a vizsgált törzsek éves körlapnövedékének 88%-a a fő növekedési időszakban (V–VIII. hó) képződött, a kezdeti növekedési időszakban (IV. hó) annak valamivel több mint 5%-a, míg a befejező növekedési időszakban (IX–X. hó) valamivel kevesebb mint 7%-a. Az egyes törzsek között nemcsak az éven belüli teljes növekedésben van eltérés, hanem annak az egyes növekedési időszakokra jutó aránya is más és más. Az éves körlapnövedékek

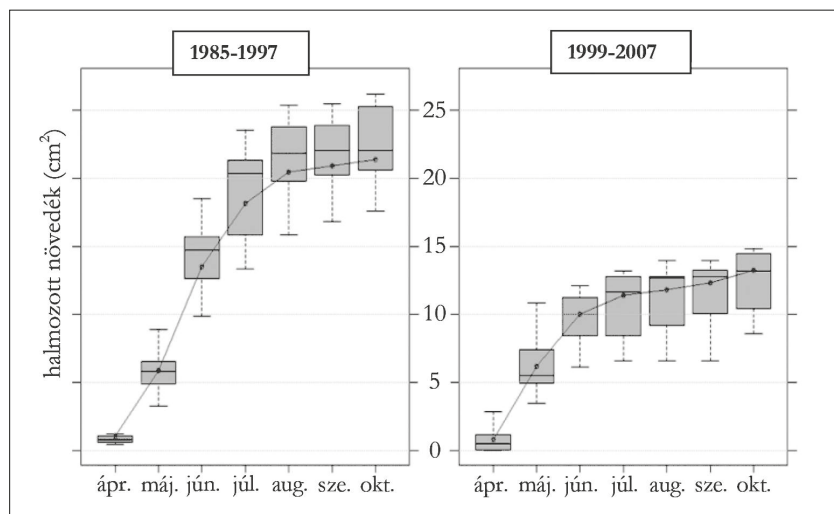
évenkénti értékei az idő előrehaladtával egyértelműen csökkenő trendet mutatnak. Hasonló eredményeket közölt Garamszegi és Kern (2014, 2016) is, akik egy dunántúli-középhegységi és két északi-középhegységi mintaterület négy különböző korú bükkös állományából származó, reprezentatív mintafákon végzett kör-lap-növedék-mérések sok évtizedes adatsorai alapján az elmúlt 30–40 év során növekedés-lassulást, az esetek többségében növekedéscsökkenést mutattak ki. Ez az idősebb állományok esetében természetesen összefügg az állományok korával is, de a mérési időintervallum alatt megfigyelhető egyértelmű hőmérséklet-emelkedéssel is. Fühner és munkatársai (2016a, b) elemzésének kiemelkedő eredménye az a megállapítás, miszerint az éghajlat változása következtében, a fő növekedési időszakokban trendszerűen csökkenő átlagos kör-lap-növedékek egyidőben, a kezdeti növekedési időszak növedéke az éves növedék arányában, a befejező növekedési időszakokra eső növedék pedig nemcsak arányában, hanem abszolút nagyságában is egyre növekszik (1.3.-9. ábra).

Az egyes hónapok növedékét külön-külön szemlélve megállapítható, hogy 22 év átlagában a fő növekedési perióduson belül a legnagyobb növekedés júniusban ($6,08 \text{ cm}^2$), majd májusban ($5,05 \text{ cm}^2$), júliusban ($3,31 \text{ cm}^2$) és augusztusban ($1,52 \text{ cm}^2$) figyelhető meg. A töréspont-elemzés alapján május és szeptember kivételével a többi hónap, ezen kívül a fő növekedési (V–VIII.) és az egész növekedési (IV–X.) periódus növekedési ütemében 1994 és 2001 között szignifikáns változás állt be. Azaz a növekedési periódus első öt (IV–V–VI–VII–VIII.) hónapjában a töréspontot jelölő évszámok előtti átlagos növedékek jóval nagyobbak az évszámot követő átlagoknál, szeptemberben és októberben viszont fordított a helyzet (1.3.-5. táblázat). Ezért

külön értékelték az 1985-től 1997-ig és az 1999-től 2007-ig terjedő időszak növekedési viszonyait. Az eltérés nemcsak abszolút értékben, hanem az egyes hónapokon belüli arányok megváltozásában is megmutatkozik. A mérési időszak első felében a legnagyobb havi növedék júniusban képződött ($7,69 \text{ cm}^2$), ennél jóval kisebb, de közel azonos májusban ($4,94 \text{ cm}^2$) és júliusban ($4,64 \text{ cm}^2$), majd csökkenő sorrendben augusztus ($2,19 \text{ cm}^2$), április ($1,04 \text{ cm}^2$), október ($0,48 \text{ cm}^2$) és szeptember ($0,45 \text{ cm}^2$) következik. Ehhez képest a mérési időszak második felében a legnagyobb növedék már májusban képződött ($5,23 \text{ cm}^2$), ami 6%-os emelkedést jelent az előző periódus átlagához képest. Júniusban ($3,26 \text{ cm}^2$), júliusban ($0,99 \text{ cm}^2$) és augusztusban ($0,37 \text{ cm}^2$) viszont már nagy volt a csökkenés (57%, 79% és 83%), amit a szeptemberi ($0,52 \text{ cm}^2$) és októberi ($0,98 \text{ cm}^2$) növekedés csak kis mértékben kompenzált (1.3.-10. ábra). Azaz a mérési időszak első periódusában az átlagos éves növedék ($21,42 \text{ cm}^2$) csaknem kétszerese a második periódus átlagos éves növedékének ($12,15 \text{ cm}^2$). A bükk növedék-változását a klíma változásával összefüggésben a 9.2. fejezet »A bükk éves növedék-menetének megváltozása« alfejezete tárgyalja.



1.3.-9. ábra. A fő és befejező növekedési időszakok kör-lap-növedékének változása a mérési időszak alatt



1.3.-10. ábra. A fánkénti havi körlap-növedék összegző görbéje a mérési periódus két szakasza átlagában

(2020) is megállapították szlovéniai bükkösökben végzett mérések alapján, hogy a nyár végi, szélsőségesen száraz időszakok hatással lehetnek a következő év átmérő-növekedésére (lásd még a »A törzs radiális növekedése és a szárazságstressz« alfejezetet az 1.2. főfejezet »A bükk fiziológiája« részében).

A teljes vizsgált időszakon belül, általában 2000-től kezdve, a növekedési időszak szinte minden hónapjának körlapnövédéjében a töréspont statisztikák szignifikáns csökkenést mutattak ki a megelőző évekhez képest (1.3.-5. táblázat). 2000 júniusában különös erősséggel csökkent a körlapnövédéj. Előtte két évvel, 1998-tól a júniusi csapadék mennyisége markánsan csökkent, aminek a késleltetett hatása mutatkozott meg a növedék későbbi változásában. A hőmérséklet lineáris emelkedését az 1.3.-11. ábra igazolja, a júniusi növedék változó reakcióját nyilván a csapadékviszonyok is befolyásolták.

1.3.-5. táblázat. Havonkénti körlap-növekedések töréspont-elemzésének eredményei

Hónapok	Töréspont (év)	Növedék (cm ²)		
		előtte	utána	eltérés
IV.	2001*	1,16	0,51	-0,65
V.	1990	5,92	4,79	-1,13
VI.	2000**	7,69	3,26	-4,43
VII.	2000**	4,64	0,99	-3,65
VIII.	1999**	2,31	0,39	-1,92
IX.	1990	0,28	0,53	0,25
X.	1994**	0,24	0,95	0,71
IX–X.	1990**	0,62	1,29	0,67
V–VIII.	2000**	19,45	9,85	-9,60
IV–X.	2000**	21,42	12,15	-9,27

Jelölés: *p<0,1; **p<0,05 valószínűségi szinten szignifikáns eltérés

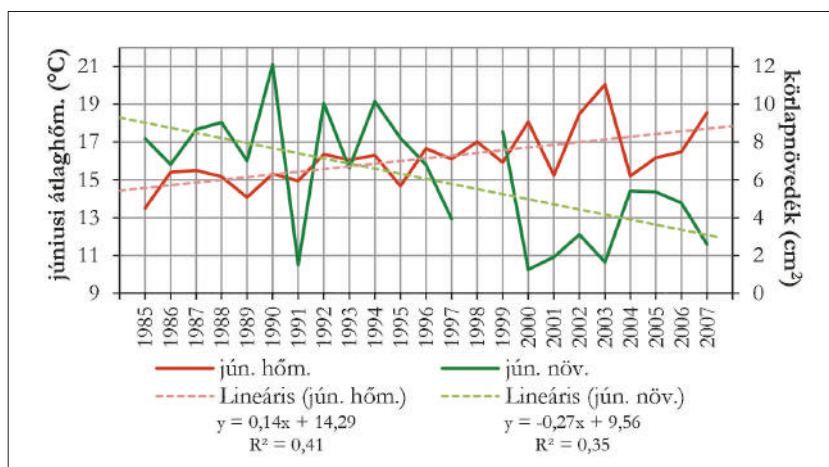
2003-ban 8,60 cm²-es éves növedéket figyeltek meg, mely a sokéves átlagnak csak a fele. Ez az év egy 2000-től 2003-ig terjedő több éves száraz periódus befejező szakasza volt. Ebben az évben az éves csapadék

(586 mm) a mérési időszak átlagos csapadéknagyságának (800 mm) csak 73%-a volt, ugyanennek megfelelő érték a növekedési periódusban 78%, a nyugalmi fázisban pedig, amikor tulajdonképpen a talaj csapadékvíz-zel való feltöltődése történik, ennél kevesebb, már csak 68%. Általában tavasszal, a téli csapadék megfelelő mennyiségben csak addig áll rendelkezésre, amíg átlagos hőmérsékleti viszonyok mellett az intenzív transzspirációs vízfelvétel ideje be nem következik. Ellenben, ha csapadékhiány lép fel különösen júniusban és júliusban, akkor az a növekedést lassítja (Fraser 1962). A vízhiány miatt csökken a levélzet mennyisége, ezzel az asszimilációs felület, és ezen állapot tartós fennállása korai levélhullást eredményezhet (Kramer 1962). A vízhiány negatív hatását az átlagosnál melegebb hőmérsékleti viszonyok jelentősen fokozhatják. Sopronban a 2003-as év kimondottan melegnek tekinthető, különösen a fő növekedési periódus (V–VIII. hó) alatt, amikor az átlaghőmérséklet (19,4 °C) 2,6 °C-kal magasabb volt a 22 éves mérési periódusra jellemző átlagnál (16,8 °C). Nem meglepő tehát, hogy a soproni bükkös növekedése július és augusztus hónapokban leállt, majd pedig a befejező növekedési szakaszban (IX–X. hó) az átlagnál 23%-kal nagyobb növekedés volt megfigyelhető. Hasonlóan a 2003-as évhez, de még annál is kevesebb növedék (5,77 cm²) képződött 1991-ben, mely évet ugyancsak rendkívüli időjárás jellemezte. Ekkor csapadékos és hűvös körülmények uralkodtak. A fő növekedési periódus 4 hónapjában lehullott csapadék összege 554 mm volt, csaknem 200 mm-rel több, mint ami a mérési periódusra jellemző átlag (359 mm). Vagyis jelentős vízfelesleg érvényesült, ami szintén növekedést korlátozó tényező. A talajban fellépő oxigénhiány és széndioxid-felhalmozódás elsősorban a gyökérzet fejlődésére hat hátrányosan (Voigt 1962). A helyzetet súlyosítja még, hogy az intenzív növekedési szakaszban (V–VI. hó) lehullott csapadék (339 mm) a mérési periódus átlagához (184 mm) képest jóval magasabb, ugyanakkor a két hónap átlagos hőmérséklete 2,7 °C-kal alacsonyabb volt 1991-ben, mint a mérési periódus átlaga (14,9 °C).

A statisztikai kiértékelés mutatta, hogy május, június, július és augusztus esetében a tárgy hó körlapnövedékére a tárgy hó és az azt megelőző hónap átlagos hőmérsékletének együttes hatása erősebb, mint a tárgy hóé. A havi adatok elemzése alapján az is megállapítható, hogy a csapadék egyértelműen erősebb és hosszabban tartó hatást gyakorol a növedékre, mint a hőmérséklet. Ez alátámasztja Gutiérrez és munkatársai (2011) megállapítását, miszerint a csapadékkal szemben a hőmérséklet szervesanyag-képződésre gyakorolt hatása rövidebb (napos, hetes) időtartam alatt érvényesül.

A bemutatott adatok alapján a 22 év átlagában két legnagyobb növekedést mutató hónap a május és a június. A májusi növedékek esetében a 22 év alatt nem figyelhető meg trendszerű változás, a júniusi növedékek viszont trendszerűen csökkennek. A változás összefügg az átlaghőmérséklet trendszerű növekedésével (1.3.-11. ábra). Amíg azonban a májusi hőmérséklet emelkedése pozitívan hat a körlapnövedékre, addig a rákövetkező hónapok hőmérséklete éppen ellenkező hatású, vagyis a hőmérséklet-emelkedés már növedékcsökkenéssel jár együtt. Az eredmények igazolták a május, június hónapok kiemelkedő szerepét a bükk szervesanyag-képzésében, ami egybecseng más szerzők dendrokronológiai elemzéseivel (Járó & Tátraaljai 1985; Dittmar et al. 2003; Lebourgeois et al. 2005; Di Filippo et al. 2007; Garamszegi & Kern 2014).

Az elemzés azt is mutatja, hogy a 2000-es évektől az intenzív növekedési szakasz (V–VI. hó) előbb kezdődött, ami a mérési helyen a szubmediterrán



1.3.-11. ábra. A júniusi átlaghőmérséklet ($n = 23$, $p < 0,001$) és növedék ($n = 22$, $p < 0,01$) évenkénti alakulása

klímahatás érvényesülését, ill. erősödését vetíti előre, és ez a bükk elterjedését is jelentősen befolyásolni fogja (Mátyás et al. 2010; Stojanović et al. 2013). Várható ezért, hogy a klímaváltozással már nemcsak növekedésveszteség, hanem a fák vitalitásának és ellenálló-képességének drasztikus csökkenése is bekövetkezhet (részletesebben lásd a »9. Bükkösök a változó klímában« fejezetben). Azt, hogy az egyes évek mely hónapjai játszanak nagyobb szerepet a növekedés szempontjából, a klíma helyi viszonyai is befolyásolják. Ezért lehetséges, hogy míg a szomszédos Szlovéniában a tárgyév májusi és júliusi csapadékának van szignifikáns hatása a növekedésre (Čufar et al. 2008), addig Magyarországon az áprilisi és júniusi csapadék a meghatározó. Vagy amíg Németországban a tárgyév és a tárgyévet megelőző év júliusának hőmérséklete döntő az átmérőnövekedés szempontjából (Gruber 2002), addig a Soproni-hegyvidéken a tárgyév és az előző év júniusi hőmérséklete a meghatározó. Ezért olyan klímaindex, ami hatásában, az összefüggések szempontjából mindenhol egyformán használható, csak fenntartásokkal képezhető.

A soproni adatokhoz hasonló eredményeket kaptak egy öreg bükkös esetében a németországi Sollingban (Schulze 1970), ahol a bükk kezdeti gyors növekedése július végén és augusztusban megállhat, majd szeptemberben október elejéig ismét felerősödik (Schmitt et al. 2000; Werf et al. 2007).

A bemutatott eredmények alapján a bükk mind a túlzott vízhiányra, mind pedig a talaj víztelítettségére érzékenyen reagál, és ez kifejezésre jut a törzsek évenkénti és éven belüli átmérő növekedésének változásában. Az egyes hónapok csapadék- és hőmérsékleti viszonyaiban nagy eltérések lehetnek. A magyarországi mérések alapján a növekedés májusban és júniusban jelentősen függ az átlaghőmérséklettől és a csapadéktól. A növekedés és a tavaszi hőmérséklet között pozitív a kapcsolat, de a következő hónapokban az összefüggés negatívvá válik. A csapadék hatása éppen az ellenkezője: tavasszal negatív összefüggést mutat a növekedéssel, míg a nyári időszakokban a kapcsolat már pozitív. Tekintettel arra, hogy a növekedés és a környezeti tényezők közötti kapcsolat igen összetett, csak ritkán találunk olyan esetet, ahol egyetlen tényező felel a növekedésért (Glock & Agertier 1962).

A szervesanyag-készlet összetétele és mennyisége egy bükkösben

Führer Ernő és Jagodics Anikó

A szervesanyag-produkció kutatása faállományokban

A faállományok szervesanyag-készlete két ellentétes biológiai folyamat eredménye, az egyik a fotoszintézis útján létrejövő szervesanyag-produkció, a másik pedig a légzés útján bekövetkező szervesanyag-veszteség. Az évenkénti különbség, vagyis a nettó primer szervesanyag-produkció (PP_n) egyrészt a fák egyes szerveinek (levélzet, hajtás, termés) képzésére fordítódik, amiből nem kis mennyiség (a lombhullató fáknál főleg a levélzet) az éves szervesanyag-forgalom részeként le is bomlik, másrészt lehetővé teszi a faállományok évenkénti növekedését és fejlődését. Nyugat-európai megfigyelések és mérések alapján Tranquillini (1992) megállapította, hogy a fontosabb fafajok szénegyenértékben kifejezett éves nettó fotoszintézise hektáronként 1,7 és 15 t között ingadozik. Az alacsonyabb értékek általában a kisebb levélterület indexszel rendelkező fiatalabb faállományokból származnak. A PP_n százalékában megadott légzési veszteség 28 és 57% közötti, ennek megfelelően pedig a növekedés során megkötött szervesanyag 43 és 72% között változik. Ez utóbbinak a többsége a törzsben és az ágakban raktározódik el, és átlagosan 19–20%-a pedig a levélzetben és a gyökérzetben.

Möller és munkatársai (1954) által végzett elemzések szerint bükkösökben az éves bruttó szervesanyag-produkció nagysága t/ha-ban kifejezve 50 éves korig növekszik, 8-tól 50 éves korig megduplázódik, 85 éves kortól viszont már fokozatosan csökken. Ugyanakkor az egyes szervek légzése miatti szervesanyag-veszteség 45 éves korig jelentősen növekszik, majd stagnál. E légzési veszteséghez még hozzájárul az elhalt levelek, ágak és gyökerek szervesanyag-mennyisége is. Ezért a kezdeti évenkénti nettó szervesanyag-gyapapodás a kor előrehaladtával fokozatosan csökken, a dendromassa-készlet pedig egyre lassabban ugyan, de növekszik.

A faállományok szervesanyag-készletének meghatározásával a magyarországi faterméstani kutatások több mint száz éve foglalkoznak. Kezdetben elsősorban a földfeletti dendromassza mennyiségének megállapítására törekedtek, majd az 1950-es évektől megindult újabb kutatások már célul tűzték ki a biomassza kompartmentek szerinti megoszlásának vizsgálatát is (Járó & Horváthné 1959; Járó 1979, 1990; Ujváriné Jármay et al. 2001).

A faállományok földfeletti szervesanyagának (élőfakészletének) nagy pontosságú becsléséhez a kiindulási adatok (fatérzfogatok) az Országos Erdőállomány Adattárban rendelkezésre állnak. Az utóbbi évtizedekben elindult, a földalatti dendromassza mennyiségére vonatkozó nemzetközi és hazai kutatásokról az 1.3. fejezet »A gyökérzet szervesanyagának térbeli megoszlása« alfejezete tartalmaz részleteket.

Az „Erdő–Klíma” kutatási program keretében 2003 és 2006 között három jellegzetes, optimális termőhelyű, fontos klímajelző őshonos fafajokból álló faállománytípus (bükkös, gyertyános-kocsányos tölgyes, cseres), majd pedig az Agrárklíma projekt keretében egy további cseres állomány teljes szervesanyag-mennyiségét határozták meg (Führer & Jagodics 2009; Führer et al. 2011a; 2014). E vizsgálatok egyebek mellett lehetővé tették az erdészeti klímaosztályok és a klímaosztályokat jellemző zonális faállománytípusok szervesanyag-képzése közötti összefüggések megismerését is.

A továbbiakban a bükkös mintaállományra vonatkozó eredményeket mutatjuk be, összehasonlítva más hazai és nemzetközi vizsgálatokkal, ill. a fent említett őshonos faállománytípusokkal. A kísérleti faállomány Bakonybél község határában a Magas-Bakony erdészeti tájban 460 m tengerszint feletti magasságban tenyészik. Az erdészeti szárazsági mutató (*FAI*) értéke (4,45) alapján bükkös klíma ($FAI_B: \leq 4,750$) jellemzi, ahol a csapadék sokéves átlaga 779 mm, az évi középhőmérsékleté pedig 8,7 °C (Führer et al. 2011b). A termőhelyi viszonyaira a többletvízhatástól független hidrológiájú, mély termőrétegű, agyagos-vályog fizikai talajféleségű agyagbemosódásos barna erdőtalaj a jellemző. Kora az elemzéskor 70 év, élőfakészlete 740,2 m³/ha, átlagnövedéke 10,6 m³/ha/év volt, egy I. fatermési osztályú, minőségi fatermelésre alkalmas állomány. A bükkös szervesanyagának felvételét Führer és Jagodics (2009) által ismertetett metodika szerint végezték el. E mérések és elemzések kiindulási alapja az alábbi szervesanyag-szintek elkülönítése volt.

Föld feletti dendromassza

A felvételi parcellában a fatermési és állományszerkezeti viszonyokat figyelembe véve méretcsoportonként, azaz két átlagos átmérőjű és magasságú (uralkodó), valamint egy afölötti (kimagasló) és egy az alatti (alászorult) törzs kijelölése történt meg, melyek egymáshoz közel álltak. Ezt követően ledöntötték az éves



1.3.-12. ábra. A kísérleti parcellában elemzett törzsek egyike
(Fotó: Führer Ernő)

szervesanyag-képződés befejeződésekor (2003. augusztus végén) a kiválasztott törzseket (1.3.-12. ábra), és felvételezték kompartmentek szerint. Az állományszerkezeti viszonyok alapján az eredményeket 1 hektárra vonatkoztatták.

A lombozat 1 ha állományra vonatkoztatott abszolút szárazanyagban kifejezett tömege 3,17 tonna volt (1.3.-6. táblázat), ebből a levélzet szervesanyaga 2,90 t, a makktermése pedig 0,27 t. A lombozat átlagos szénkoncentrációja az abszolút száraz (a.sz.) tömeg 52,1%-a. Ennek megfelelően 1 ha állományra számítva a lombozat 1,65 t szenet tartalmaz, ami a földfeletti dendromassza szénkészletének 0,7%-a.

1.3-6. táblázat. A vizsgált bükkös dendromasszájának abszolút száraz tömege (t/ha), szénkoncentrációja (%) és szénkészlete (t/ha)

Mért elemek	Föld feletti dendromassza				Föld alatti dendromassza			Mind-összesen
	lombozat	ágszerkezet	törzs	összes	tuskó, gyökfő	gyökérzet	összes	
A. sz. tömeg	3,17	107,0	371,0	481,0	40,0	72,8	112,8	593,8
C-koncentráció	52,1	50,9	50,4	–	50,2	40,0	–	–
C-készlet	1,65	54,3	187,0	243,0	20,1	29,1	49,2	292,2

A. sz. – abszolút száraz tömeg

Az ágszerkezet abszolút száraz tömege 1 hektáron 107 tonna (1.3.-6. táblázat), azaz 34-szer több mint a levélzet tömege. A legmagasabb átlagos szénkoncentráció a 2–5 és az 5–10 cm-es átmérő-csoportba tartozó ágaknál jelentkezik, 52,4%, illetve 52,1% értékekkel, a legkisebb pedig a 10–15 (49,7%) és a 15–20 cm (49,5%) átmérő-csoportba tartozó ágaknál figyelhető meg. A bükk ágszerkezetének átlagos szénkoncentrációja ennek megfelelően 50,9%, ami alapján 1 ha bükkös ágszerkezetének szénkészlete 54,3 tonna. Az ágszerkezet a.s.z. és szénegyenértékben kifejezett tömege a földfeletti dendromasszájának 22 %-a.

A törzs dendromassza 1 ha állományra vonatkoztatott abszolút száraz tömege 371 tonna (1.3.-6. táblázat), ebből 299 t az ágtiszta törzsrészben halmozódott fel, ami a törzs össztömegének 81%-át teszi ki. Az a.s.z. állapotú törzsek átlagos szénkoncentrációja 50,4%. Ennek megfelelően 1 ha állományra vonatkoztatott szénkészlet 187 t, amely 3,4-szerese az ágszerkezet szénkészletének és több mint 113-szorosa a lombozaténak. Az ágtiszta törzsrész szénkészlete pedig 151 t.

Összességében tehát megállapítható, hogy a vizsgált bükkös földfeletti dendromasszájának szárazanyag-tartalma és a benne felhalmozódott szénkészlet nagysága 1 ha állományra számítva 481 ill. 243 t, a lombozatban ennek 0,7%-a, az ágakban 22,3%-a, míg a törzsben 77%-a található.

A szárazanyag-tartalom tömegére, és az egyes kompartmentek arányaira hasonló eredményeket kapott Koloszar (1981) és Járó (1990) ugyancsak a Magas-Bakony erdészeti táj 2-2 erdőrészletében, ahol adattári fatömegadatokról kiindulva és néhány mintafa felvételezése segítségével határozták meg az állományok szárazanyag-tömegét (1.3.-7. táblázat). Látható, hogy a földfeletti dendromasszáján belül a lombozat és a faanyag tömegének százalékos aránya mind az 5 állománynál szinte azonosnak tekinthető, a lombozat 0,5 és 0,7%, a faanyag pedig 99,3 és 99,5% között mozog, függetlenül a földfeletti dendromassza nagyságától. Szembetűnő eltérés figyelhető meg azonban az ágszerkezet és a törzs tömegének arányainál, a korrall összefüggésben. Amíg a fiatal 44 éves ugodi bükkösben az ágak aránya a földfeletti dendromasszához viszonyítva 58,7%, addig a 70 éves bakonybéli bükkösben már alig több mint 22%, a 108 éves ugodi bükkösben pedig nem éri el a 12%-ot. Természetesen a törzs szervesanyaga éppen fordított, a korrall arányosan növekvő sorrendet mutat.

1.3.-7. táblázat. A farkasgyepűi (Kolozsár 1981), bakonybéli (Führer & Jagodics 2009) és ugodi (Járó 1990) bükkös vizsgálati területek földfeletti dendromasszájának tömege és megoszlása, kor szerinti sorrendben

Erdőrészlet	Ugod 31D		Bakonybél 13C		Farkasgyepű 23E		Farkasgyepű 23C		Ugod 30G	
	t/ha	%	t/ha	%	t/ha	%	t/ha	%	t/ha	%
Kor	44 év		70 év		105 év		105 év		108 év	
Dendromassza	t/ha	%	t/ha	%	t/ha	%	t/ha	%	t/ha	%
1. lombozat (levél + makk)	1,75	0,50	3,17	0,66	3,15	0,64	4,14	0,68	3,20	0,70
2. ágak	206,87	58,70	106,83	22,21	–	–	–	–	54,86	11,91
3. törzs	143,76	40,80	371,00	77,13	–	–	–	–	402,34	87,39
4. faanyag (2. + 3.)	350,63	99,50	477,83	99,34	496,40	99,36	605,95	99,32	457,20	99,30
5. földfeletti (1. + 4.)	352,38	100,00	481,00	100,00	499,55	100,00	610,09	100,00	460,40	100,00

Föld alatti dendromassza

A gyökérvizsgálat monolitos talajminta-vételezéssel történt, melyet először Magyarországon Járó (1991, 1995) alkalmazott. A mintavételi módszert ugyanebben a főfejezetben »A gyökérzet szervesanyagának térbeli megoszlása« alfejezet ismerteti.

A tuskó és a gyökfő (gyökérfa) szervesanyagának tömege 1 ha állományra átszámítva 40,0 t. Az abszolút száraz tömeg százalékában megadott szénkoncentráció a tuskó és gyökfő esetében is a földfeletti kompartmentekhez hasonló nagyságú, 50,2%. Ennek megfelelően a tuskó és a gyökfő szénkészlete 1 ha állományra átszámítva 20,1 t.

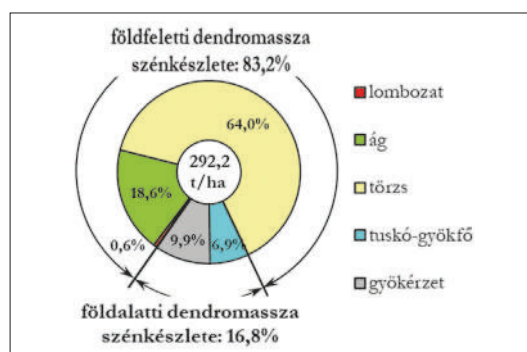
A gyökérzet a.s.z. állapotú szervesanyag-tömege 1 ha-on 72,8 t. A gyökérzetben a földfeletti dendromasszához képest kisebb az átlagos szénkoncentráció, a vizsgált bükkösben 40,0%. Ennek megfelelően a gyökérzet szénkészlete 1 ha-on 29,1 t. Ebből legnagyobb mennyiségű az 5–20 mm-es (26%), a legkisebb pedig a 2–5 mm-es átmérő tartományba (9%) eső gyökerek széntömege.

Összességében megállapítható, hogy a földalatti dendromassza szénkészlete 1 ha állományra számítva 49,2 t, a tuskó és gyökfőben ennek 41%-a, a gyökérzetben pedig 59%-a található.

Összes dendromassza

A vizsgált 70 éves bükkös dendromasszájában felhalmozódott szénkészlet nagysága tehát összesen 292,2 t (1.3.-13. ábra). Ennek 83,2%-a a földfeletti dendromasszában (levélzet: 0,6%; ágak: 18,6%; törzs: 64%), 16,8%-a pedig a földalatti dendromasszában (tuskó és gyökfő: 6,9%; gyökerek: 9,9%) allokálódott.

A magyarországi eredményeket összehasonlítva a német Solling-i kísérleti terület 120 éves bükkösében mért adatokkal (1.3.-8. táblázat) látható, hogy az egyes kompartmentek értékei mások, ami egyrészt magyarázható az eltérő ökológiai adottságokkal. Solling-ban, optimális klímaadottságok között a bükk összes szénkészlete (353 t/ha) 61 tonnával nagyobb, a gyökérzet tömege (40 t/ha) viszont



1.3.-13. ábra. A dendromassza szénkészletének megoszlása kompartmentek szerint a vizsgált bükkösben

9 tonnával kevesebb, mint Bakonybélben. A két állomány átlagnövedéke közötti különbség pedig visszavezethető az állományok korának különbségére.

1.3.-8. táblázat. Dendromassza szénkészletének tömege és megoszlása egy 120 éves Solling-i (Németország; Ellenberg et al. 1986) és a 70 éves bakonybéli bükkösben (Führer & Jagodics 2009)

Dendromassza	Solling		Bakonybél	
	t/ha	%	t/ha	%
1. faanyag (törzs+ágak)	309	88	242	82
2. lombzat (levél, stb.)	4	1	> 1	< 1
3. földfeletti összes	313	89	243	83
4. földalatti (gyökérzet)	40	11	49	17
5. összes	353	100	292	100
6. kor (év)	120		70	
7. átlagnövedék (1./6.), t/ha/év	2,58		3,46	

Az avar- és humuszszint, valamint a talaj szervesanyag-készlete

A vizsgált bükkös állomány *avar- és humuszszintjében* 1 hektáron összesen 96,7 t szárazanyag halmozódott fel. Ebből 8,4 tonna (9%) a bomlatlan avar, 6,7 t (7%) a bomló avar, és legnagyobb tömegű a humuszszint, 81,6 t, ami az avar- és humuszszint 84,4%-át teszi ki. Az átlagos szénszázalék 11,6%, a bomlatlan részekben nagyobb, 45% körüli, a bomló szervesanyagban már jóval kisebb, a humuszban pedig már csak 5,2%. A vizsgált bükkös 1 hektárján így összesen 11,2 t az avar- és humuszszintben felhalmozódott szén mennyisége. Ebből 3,81 tonnát a bomlatlan avar, 2,11 tonnát a bomló avar és 5,3 tonnát a humusz tesz ki. Feltételezhető, hogy az avartakaró szervesanyaga hosszú távon egyensúlyban van, vagyis a bevétel (friss levélzet) és a lebomlás mértéke több év átlagában, évenként eltérő mértékben ugyan, de megegyezik. Rövid és középtávon azonban az időjárási tényezők gyors és drasztikus ingadozása a lebomlási folyamatokat sokszor olyan mértékben erősítheti fel, ami miatt a faállomány egyes éveken nem elnyelőként, hanem kibocsátóként vesz részt a szénforgalomban (Jagodics & Führer 2023), azaz a humuszszintből többlet lebomlással több széndioxid távozik a légkörbe, mint amennyit az erdő a fotoszintézis során megköt.

A *talajban* található szerves szénkészlet nagysága a vizsgált állományban 150 cm-es talajmélységig rétegenként összesítve és szintén 1 hektárra vonatkoztatva összesen 114 t, ami az avar- és humuszszintben felhalmozódott szénkészlet tízszerese.

Az eredmények felhasználása a szénkészlet-becsléshez

A vizsgált bükkös egyes szintjeiben mért és számított adatokat összesítve és 1 hektárra vonatkoztatva a faállományban tárolt összes szénkészlet nagysága 417 t. Ennek 58%-a a földfeletti dendromasszában, 12%-a a földalatti dendromasszában, közel 3%-a az avar- és humuszszintben, 27%-a pedig a talajban található.

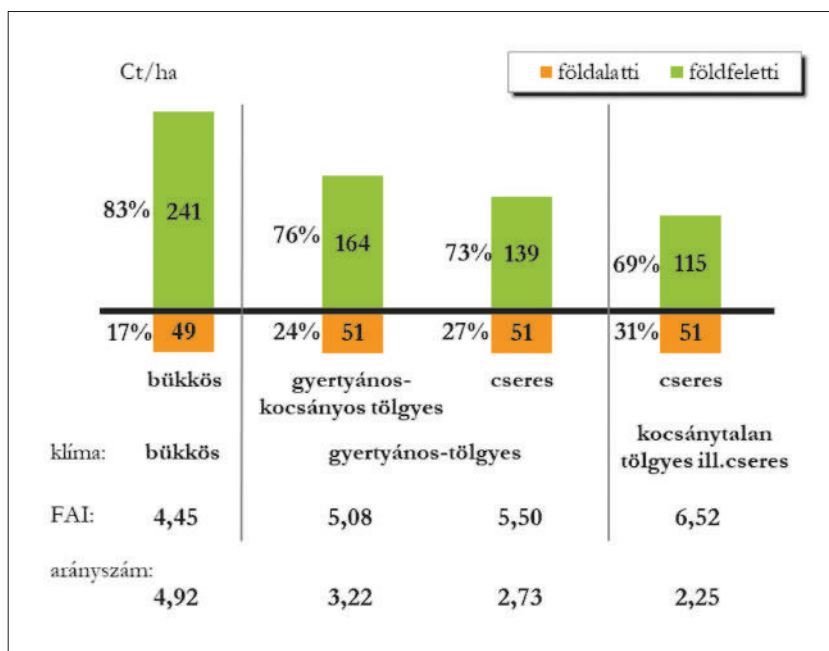
A dendromassza vizsgálati adatait érdemes összehasonlítani más klímában tenyésző klímajelző fajok mérési eredményeivel. Amennyiben a hidrológiai és talajtani viszonyok kedvezőek, azaz nincs a termőhely termőképességét csökkentő egyéb tényező (pl. cementált réteg, kedvezőtlen kémiai talajtulajdonság stb.), és a gyökérzet fejlődésének lehetősége is adott, akkor a faállományok szénegyenértékben kifejezett szervesanyag-tömege, még ha azok eltérő fajú állományok is, csak a klimatikus adottságoktól függ. Ezért más erdészeti klímaosztályoknak (gyertyános-tölgyes, kocsánytalan tölgyes, ill. cseres) megfelelő faállományokban (gyertyános-kocsányos tölgyes és cseres) hasonló céllal, tartalommal és módszertannal elvégzett kísérletek (Führer & Jagodics 2009; Führer et al. 2014; Marjanović et al. 2011) eredményei azt mutatják, hogy a kísér-

leti helyek termőhelyi potenciáljának gyengülésével, azaz az erdészeti szárazsági mutató (*FAI*) értékének növekedésével a vizsgált faállományok dendromasszájában megkötött szénkészlet egyértelműen csökken (1.3.-14. ábra). Tehát a konkrét mérési eredmények alapján a nedvesebb és hűvösebb klímájú (*FAI*: 4,45) bükkös élőfakészletének (törzs+ágszerkezet) széntömege (241 t/ha) több mint kétszerese a melegebb és szárazabb klímájú (*FAI*: 6,52) cseresének (115 t/ha). Ugyanakkor a földalatti dendromassa tömege alig változik (49, ill. 51 t/ha). Azaz amíg a különböző fajfajú állományok a rendelkezésükre álló termőréteget gyökérzetükkel közel azonos mértékben, jól behálózzák, addig a klimatikus adottságoktól függően az élőfakészletükben tárolt szénkészlet jelentősen különbözik. Ez az eredmény előre vetíti, hogy Magyarországon a klímában bekövetkező negatív tendenciák várhatóan elsősorban a földfeletti dendromassa nagyságát, vagyis a faállományok élőfakészletét fogják csökkenteni.

A földfeletti dendromassa széntartalmát a földalatti dendromassa széntartalmához viszonyítva megállapítható, a földalatti dendromassa egységnyi tömegű szénkészletéhez tartozó élőfa- és szénkészlet (föld-

feletti dendromassa) aránya a klímától függ. Vagyis kedvezőtlenebb, azaz melegebb és szárazabb klímakörülmények között a levélzet nélküli földfeletti és földalatti dendromassa aránya csökken. A vizsgálatok alapján a bükkös klímában tenyésző bükkösben ez az arányszám 4,92 (*FAI*: 4,45), a gyertyános-tölgyes klímában tenyésző gyertyános-kocsányos tölgyesben 3,22 (*FAI*: 5,08), még ugyanezen klímában, de melegebb és szárazabb körülmények között álló cseres ökoszisztémában 2,73 (*FAI*: 5,50), végül a kocsánytalan tölgyes, ill. cseres klímában lévő cseresben pedig már csak 2,25 (*FAI*: 6,52). Természetesen a hűvös és csapadékos körülmények ugyancsak eredményezhetik a földfeletti és földalatti dendromassa arányának csökkenését. Azonban ilyen körülmények Magyarországon csak a Kőszegi-hegység és a Központi-Bükk erdészeti tájakon fordulnak elő, általában kedvezőtlen talajviszonyokkal párosulva.

Tehát kedvező termőhelyi viszonyok mellett, a földfeletti dendromasszából, azaz az élőfakészlet adatokból levezetett tárolt szénmennyiség alapján, az erdészeti szárazsági mutatóval (*FAI*) modellezhető szénkészlet arányszám segítségével becsülhető a földalatti dendromasszában tárolt szénkészlet nagysága. Ha kedvezőtlenebb talajadottságok, mint pl. vékonyabb termőréteg vagy cementált vízzáró réteg miatt a földfeletti élőfakészlet kisebb, akkor a földalatti dendromassa is ennek megfelelően kevesebb lesz. Bár e megközelítés bizonyára nem érvényes minden esetre, mégis a földalatti dendromasszára pontosabb, ökofiziológiailag megalapozottabb becslést szolgáltat annál a sematikus megközelítésnél, mely szerint a földalatti dendromassa általában a teljes dendromassa 20–25%-át teszi ki (Führer et al. 1991; Somogyi 2008a; Sopp & Kolozs 2013).



1.3.-14. ábra. A földfeletti (levél nélküli) és földalatti dendromassa szénkészlete és egymáshoz viszonyított arányai a vizsgált állományokban (Führer et al. 2014)

A gyökérszet térbeli elhelyezkedése

Führer Ernő és Jagodics Anikó

Faállományok gyökérfeltárása

Az erdészeti kutatások az egyes faállományok szervesanyag-készletének meghatározásán belül kevesebb figyelmet szenteltek a földalatti dendromassa felvételére, mint amennyit a téma fontossága indokolna. A termőtalaj gyökérszettel való feltártsága egyrészt befolyásolja a talajfejlődés folyamatát, másrészt a gyökérszet a tápanyag- és vízfelvételen keresztül meghatározza a fák fejlődési, illetve növekedési tulajdonságait. Ezért a faállományok gyökérszetének ökológiai és fiziológiai jelentősége vitathatatlan (1.3.-15. ábra).

Nemzetközi viszonylatban a 20. században számos publikációban és összefoglaló nagyobb lélegzetű monográfiában foglalkoztak a különböző fafajok gyökérrendszerének tipizálásával és jellemzésével. Széleskörűen és mélyrehatóan vizsgálták a problémát Észak-Európában a finnek (Laitakari 1929; Kalela 1949), Nyugat-Európában a németek (Biebelriether 1962; Köstler et al. 1968), a svájciak (Leibundgut et al. 1963; Polomski & Kuhn 1998) és az osztrákok (Glatzel 1961). A múlt század végén először az Európa-szerte elterjedt erdőpusztulások (Bauch & Schröder 1982; Murach 1984; Stienen et al. 1984; Meyer 1987; Eichhorn 1992), majd pedig olyan nagyívű projektek, melyek az erdei ökoszisztémák ökológiai viszonyait és produktivitását hivatottak feltárni (pl. Solling-Projekt, Ellenberg et al. 1986), irányították újból a figyelmet a gyökérvizsgálatok szükségességére.

Hazánkban az első nagyobb tanulmányt Magyar (1929) készítette, aki az 1923-ban elfogadott Alföldfásítási törvény gyakorlati megalapozása és kivitelezése érdekében csemetekerti körülmények között és szikes talajokon végzett gyökérvizsgálatokat erdei fafajokon és cserjéken. Véleménye szerint a kedvezőtlen ökológiai adottságú Alföldünkön „a szikfásítás kérdése talaj-, illetőleg gyökérszetkérdés.” Legfontosabb eredményeit az alföldfásításban, elsősorban a fafaj-megválasztás során messzemenőig figyelembe vették és hasznosították (Magyar 1961).

Erdei fák erdőművelési tulajdonságainak megítéléséhez Majer (1958) is fontosnak tartotta a gyökérszet ismeretét. Ezért bakonyi bükkösökben nemcsak vázas gyökérfeltárási eljárással, hanem a fatörzsektől 2 m-es távolságban 1 m²-es alapterületű és termőréteg-vastagságú monolitban is meghatározta a gyökerek tömegét és hosszúságát átmérőtartományok szerint.

Vázás rendszerű gyökérfeltárásokat végzett homoki termőhelyek cserjefajainál az 1950-es évek végétől Faragó (1960, 1972). A hagyományos, vázas feltárások alkalmasak a termőhely-hasznosítás és a talajszerkezet hatásának megállapítására, de a gyökérrendszeréről, annak mennyiségéről, ill. minőségéről csak szubjektív tájékoztatást nyújtanak. Ezért Járó (1991, 1995) monolitos gyökérvizsgálatokat végzett több állományalkotó fafajnál. Megállapította, hogy a fák életében ökofiziológiai szempontból fontos szerepet játszó gyökértömeg fafajtól függően



1.3.-15. ábra. Bükkös gyökérszete egy talajszelvényben (Vétyem, Zala vm.; Fotó: Mátyás Csaba)

az összes szervesanyag 10–30%-a, és hogy a termőhely termőrétegét ugyan eltérő intenzitással, de gyökereikkel legjobban az őshonos fajok hasznosítják.

A gyökérzet szervesanyagának térbeli megoszlása

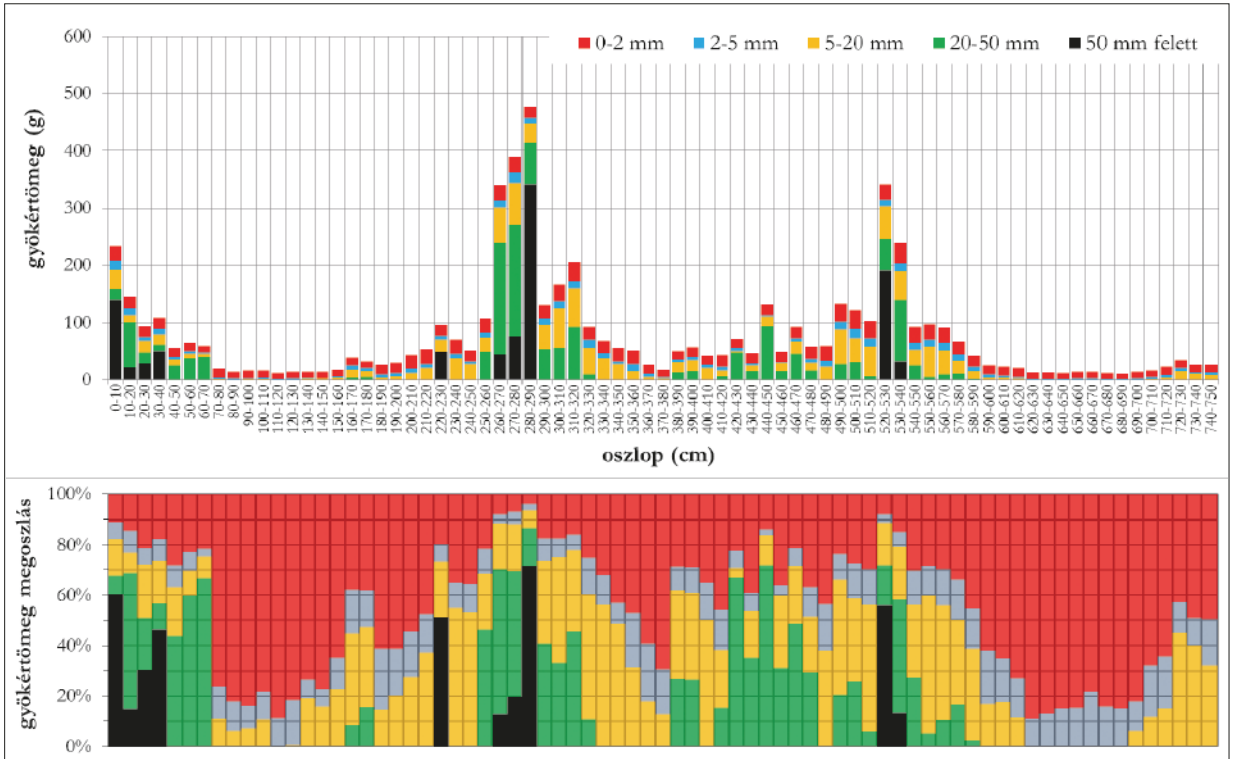
A legutóbbi időben Führer és Jagodics (2009) vizsgálták az egyes fajok dendromasszájában megkötött szénkészletet. Ebben a főfejezetben a »Földalatti dendromassa« alfejezet a gyökérzet tömegének és gyökérvastagság szerinti megoszlásának ismertetésére szorítkozik, és nem terjed ki a gyökérzet típusának, a gyökerek horizontális és vertikális elhelyezkedésének értékelésére. A jelen alfejezet Führer és munkatársai (2011a) nyomán részletesebben mutatja be egy bükkös faállomány gyökérvizsgálati eredményeit, összehasonlítva azokat egy gyertyános-kocsányos tölgyesben és egy cseresben mért adatokkal. A vizsgált bükkös ökológiai és állományszerkezeti jellemzése a fent említett alfejezetben található. A gyökérfelvételekhez az állományszerkezet átmérőcsoportjainak megfelelően kiválasztott három szomszédos, átlagos törzstávolságban lévő kimagasló, ill. uralkodó fa között, azok tővét érintve kb. 1 m széles és 1,5 m mély futóárok falából történt egy erre a célra kialakított monolit-mintavevővel az 1 dm³-es talajmonolitok kivétele (1.3.-16. ábra), először horizontálisan egy sorban haladva fától fáig, majd pedig ezt vertikálisan a talajfelszíntől lefelé ismételve másfél méterig.



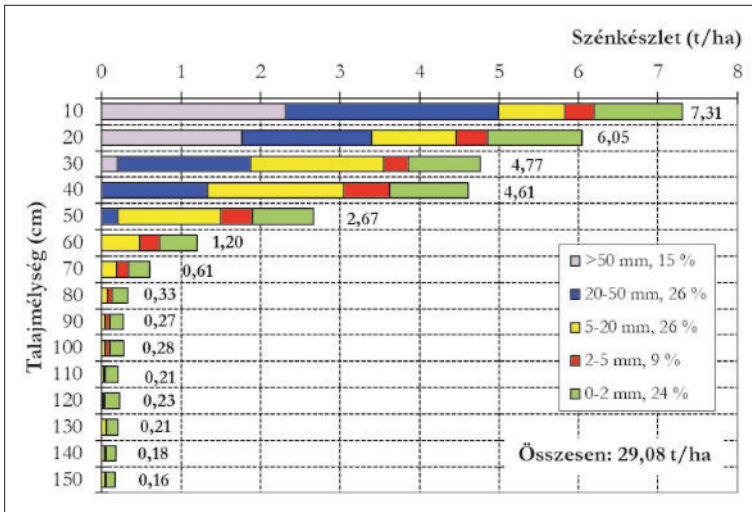
1.3.-16. ábra. Monolitos gyökérfeltárás bükkösben
(Fotó: Führer Ernő)

A »Földalatti dendromassa« alfejezet megadja a vizsgált bükkös állomány gyökérzet tömegét, valamint a benne tárolt szén mennyiségét és részarányát a dendromasszából. A gyökerek térbeli, *horizontális elterjedéséből* megállapítható (1.3.-17. ábra), hogy az egyes gyökérvastagsági csoportok a törzstől kiindulva eltérő távolságokig érnek el. Amíg az 50 mm-nél vastagabb tartógyökerek a talajba lefelé hatolva kizárólag a törzs alatt fordulnak elő, addig a kisebb vastagsági csoportok gyökérmennyisége a törzstől távolodva fokozatosan csökken, és a törzsközi térben már csak a vékonyabb ($\varnothing < 5$ mm) gyökerek egyenletes eloszlású hálózata figyelhető meg (Führer et al. 2011a). Ebből következik, hogy a bükk gyökérzetének horizontális kiterjedése általában a koronavetület széléig tart és két fa koronavetülete találkozásánál a már amúgy is alacsony gyökértömeg 85%-a 2 mm-nél vékonyabb, 15%-a pedig 2–5 mm-es átmérő tartományba esik.

A gyökérzet *vertikális elterjedése* azt mutatja (1.3.-18. ábra), hogy az egyes rétegekben lévő gyökerek összes tömege lefelé haladva fokozatosan csökken. Az alsó 30 cm-es talajrétegben (120–150 cm) a felső 30 cm-es rétegben fellelhető teljes gyökértömegnek csak 3%-a található. Amennyiben a fiziológiai szempontból aktív finomgyökérzet ($\varnothing < 2$ mm) fentiek szerinti eloszlását nézzük, akkor már más a kép: az alsó 30 cm-es rétegekben fellelhető finomgyökérzet fajlagos mennyisége a felső 30 cm-es rétegekhez viszonyítva eléri a 11%-ot. E megoszlás részben utal a gyökérzet típusára. A bükkre általában szívgyökérzet a jellemző, vagyis a durvább gyökerek ($\varnothing > 5$ mm) mennyisége és fajlagos vertikális megoszlása lefelé fokozatosan, de nagyobb mértékben csökken, mint a finomgyökérzeté. A felső 100 cm-es talajrétegben elhelyezkedő gyökérzet tömege meghaladta a teljes gyökértömeg 96%-át. Tehát, még ha a talajadottságok lehetővé is teszik a gyökereknek a mélyebb rétegekbe történő behatolását, mint ahogyan az a vizsgált bükkös esetében is fennáll, a gyökérzet zöme elsősorban az egy méteres mélységű termőréteget hálózta be.



1.3.-17. ábra. Az 1 dm² alapterületű, függőlegesen kivett talajmonolitok abszolút száraz állapotú gyökértömegei (g/15 dm³) és megoszlása gyökérvastagság szerint fatörzstől fatörzsig a vizsgált bükkösben



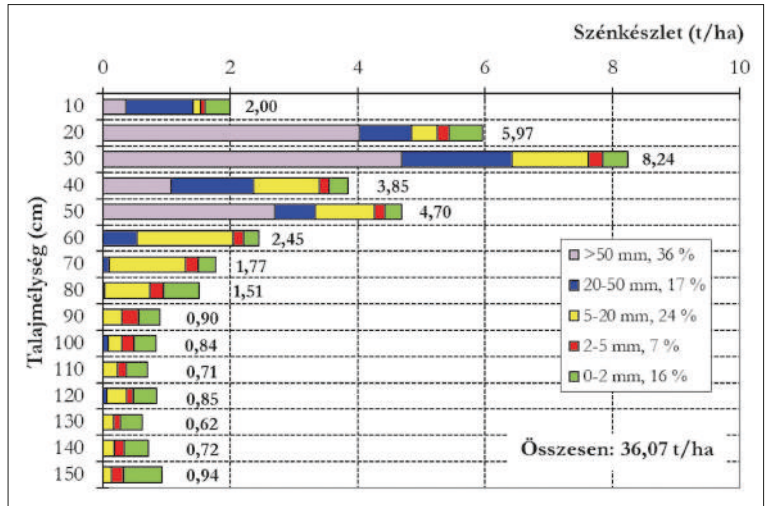
1.3.-18. ábra. Bükkös gyökérzetében tárolt szén mennyisége mélység és gyökérvastagság szerint (Führer et al. 2011a)

Gyökérrendszerek összehasonlítása

A vízforgalomban döntő szerepet játszik a gyökérrendszer típusa. E típusok a termőhelyi viszonyoktól függően nagy változatosságot mutatnak (Köstler et al. 1968). Szárazabb termőhelyeken csak a mélyre hatoló karógyökérzet képes megfelelő vízellátást biztosítani, ami pl. a tölgyesekben és a cseresekben megfigyelhető. A kedvezőbb nedveség-ellátású termőhelyeken általában szívgyökérzet alakul ki. A bükkös gyökérrendszerével kapcsolatos vizsgálati eredményeket összehasonlítva egy gyertyános-kocsányos tölgyes és egy

cseres faállomány hasonló méréseivel (Führer et al. 2011a) szembevetve, hogy amíg a bükkös szívgyökérzet tömege a talaj mélységével fokozatosan csökken (1.3.-18. ábra), addig a másik két faj karógyökérzetének szervesanyag-készlete a mélységgel kezdetben növekedik, majd csökken, majd egy átmeneti növekedés után fokozatosan tovább csökken a talajban (1.3.-19. ábra). Amíg a bükkösben a stabilitást biztosító vastagabb átmérőcsoportba tartozó tartó- ($\varnothing > 50$ mm) ill. szilárdító (20–50 mm) gyökerek csak 30, ill. 50 cm-es talajmélységig fordulnak elő, addig a gyertyános-kocsányos tölgyes és cseres faállományban a tartógyökerek

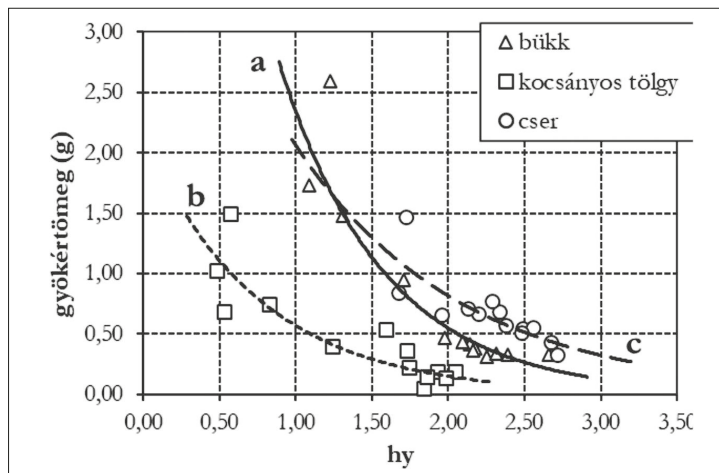
50 cm-es, a szilárdító gyökerek pedig még 100 cm-es mélységben is előfordulnak. A gyökérrendszerbeli különbséget alátámasztja az is, hogy az 50 cm-es talajmélységig a szívgyökérzetű bükk állományában a teljes gyökérzet tömegének 87%-a, a gyertyános-kocsányos tölgyesben és cseresben pedig csak 60%-a ill. 68%-a helyezkedik el. A 100 cm-es mélység alatti termőréteget a bükkös gyökérzetének csak 4%-a, a gyertyános-kocsányos tölgyesének már 9%-a, a cseres gyökérzetének pedig 11%-a hasznosítja. Igen szembeütő a fiziológiailag aktív finomgyökérzet ($\varnothing < 2$ mm) vertikális eloszlásában megnyilvánuló különbség is. A nedvesebb és hűvösebb klímájú bükkösben a finomgyökérzet tömege a legfelső 30 cm-es rétegben (3,21 t/ha) jóval több, mint amennyi a legalsó 30 cm-es rétegben (0,37 t/ha) található. A szárazabb és melegebb termőhelyű cseresben viszont a legfelső (1,30 t) és a legalsó (1,34 t) 30 cm-es talajrétegben csaknem megegyezik a finomgyökérzet hektáronkénti tömege.



1.3.-19. ábra. Cseres gyökérzetében tárolt szén mennyisége mélység és gyökérvastagság szerint (Führer et al. 2011a)

A finomgyökérzet és a fizikai talajféleség kapcsolata

Az egyes faállományokban végzett összehasonlító vizsgálatok lehetővé tették annak értékelését, hogy a fiziológiai szempontból fontos finomgyökerek behálózottsága vajon csak fafajoktól függ-e, vagy bizonyos talajadottságok is befolyásolják azt. A bükk gyökérzete igen érzékenyen reagál pl. oxigénhiány fellépésére és a talaj mechanikai ellenálló-képességére, azaz mechanikai összetételére. Változó vízellátású termőhelyeken, pl. a szívgyökérzetre jellemző félgömbforma ellaposodik, a finomgyökérzet többsége (kb. 70%-a) a tartó- és szilárdító gyökerekkel együtt felszorul a felső 30–40 cm-es talajrétegekbe, emiatt a bükk igen érzékennyé válik a vihar- és szélöntésekre (Kreutzer 1961).



1.3.-20. ábra. Bükk (a: $10,011e^{-1,4526x}$, $R^2 = 0,911$), kocsányos tölgy (b: $2,154e^{-1,3312x}$, $R^2 = 0,717$) és cser (c: $5,1986e^{-0,9247x}$, $R^2 = 0,741$) fafajok 2 mm-nél kisebb átmérőjű gyökereinek mennyisége és a hy-érték összefüggése talajrétegenként (Führer et al. 2011a)

Magyarországon Führer és munkatársai (2011a) összefüggés-elemzést végeztek az egyes talajrétegek mechanikai összetételére jellemző hy-érték és a finomgyökérzet tömege között (1.3.-20. ábra). Három állományban, bükkösben, gyertyános-kocsányos tölgyesben és cseresben kapott értékpárok szoros exponenciális összefüggést mutatnak, ami az ok-okozati kapcsolat fennállását fafajoktól függetlenül, általánosságban is megerősíti. Az eredmények tehát igazolják, hogy az egyes talajrétegek finomgyökérzettel való behálózottságának mértéke különbözik egymástól, és hogy ezen eltérések a talajrétegek (genetikai talajsintek) fizikai tulajdonságaival szoros összefüggésben állnak.

Kitekintés

Abból kiindulva, hogy a fák finomgyökérzete fontos szerepet játszik a víz- és tápanyagfelvételben, és a hajtások vízzel való ellátottságában, többen feltételezték, hogy a hajtás- és a gyökérnövekedés között funkcionális egyensúly áll fenn (Cannell & Willett 1976; Johnson et al. 1984; Mansfield 1988). Azok a tényezők (hőmérséklet, nedvesség stb.), melyek a gyökér felépítéséhez szükséges asszimilátumok produkcióját korlátozzák, egyben gátolják a gyökérnövekedést is. A hajtásnövekedés miatti többlet szénhidrátigény automatikusan kiváltja a gyökérnövekedés mértékének csökkenését. Deans (1979) valamint Langlois és munkatársai (1983) kimutatták, hogy a gyökérnövekedés minimuma egybeesik a hajtásképződés intenzív szakaszával. Götttsche (1972) szerint pedig a finomgyökérzet legnagyobb tömege május végén, június elején, de mindenképpen a levélzet teljes kifejlődése után figyelhető meg (Ellenberg et al. 1986). Sajnos a gyökérképződés teljes körű ökofiziológiai kiértékelése még várat magára, mivel a gyökérzet szerepe a tápanyag- és a vízfelvétel folyamatában kevésbé ismert. Az azonban igazolható, hogy a finomgyökérzet és a hajtás tömeg aránya átlagos fejlődés mellett fafajspecifikus (Lyr & Hoffmann 1992).

Magyarországon a már ismertett három, eltérő klímazonában tenyésző faállományban (bükkös, gyertyános-kocsányos tölgyes és cseres) a finomgyökérzet ($\varnothing < 2$ mm) és a hajtás ($\varnothing < 1$ cm) tömegarányai mutatják, hogy a legcsapadékosabb, azaz a legjobb vízellátottságú termőhelyeken tenyésző bükk esetében az arányuk a legnagyobb, 2,49, a kocsányos tölgyénél 2,14, a csernél 1,9, míg gyertyánál csak 0,39. Ez utóbbi alacsony érték azonban nem a talaj vízellátottságával függ össze, hanem azzal a körülménnyel, hogy a gyertyán a második koronaszintben található, leárnyékolt állapotban fejlődik, vagyis az állomány fényviszonyai és a faj által elfoglalt helyzet is szerepet játszik (Götttsche 1972). Az árnyékhatás valamennyi fafajnál a gyökér és hajtás arányának csökkenéséhez vezet, ugyanis a fényhiányt először és elsősorban a gyökérzet növekedésének a redukciója követi, ami a szervesanyag-képzésre is negatívan hat. Természetesen egyéb tényezők is, mint pl. a nitrogén-ellátottság, vagy a talaj- és légköri hőmérséklet is nagymértékben befolyásolhatja még a fajokra jellemző specifikus gyökér-hajtás arányt (Lyr et al. 1963, 1964). A fényviszonyoknak és az árnyalási körülményeknek a gyökérzet fejlődésére gyakorolt hatása különös jelentőségűvé válik a természetes felújítások gyakorlati kivitelezésében, és az örökerdő szemlélet terjedésével.

Tápelem-készlet és -forgalom

Führer Ernő, Bidló András és Jagodics Anikó

A fák környezetükből, elsősorban a talajból, kisebb részben a légkörből és a vízből (felületen összefutó és talajvízből) vesznek fel tápelemeket. Ennek egy része a fák szerveibe (törzs, ág, gyökér) tartósan beépül, a másik része pedig adott időtartam alatt lebomlik, és a tápanyagforgalmon keresztül ismét felvehető lesz. A legfontosabb tápelemek a makroelemek: a nitrogén (N), foszfor (P), kálium (K), kalcium (Ca) és a magnézium (Mg). A fák egyes szerveiben előforduló tápelemek mennyisége általában faj-, ill. származás-specifikus, de jelentős hatást váltanak ki a fák egyes szerveinek (kompartimentjeinek) eltérő funkciói, valamint a tápelemek fatesten belüli mobilitási tulajdonságai, továbbá a termőhelyi és állományszerkezeti feltételek is.

Már a 19. században is foglalkoztak az erdőállományok tápanyagháztartásával, ugyanis az erdei avar elterjedt használata az erdők növekedésének visszaesését eredményezte (Leiningen-Westerburg 1934). Az erdőművelési beavatkozások szinte mindegyik módja is tápanyagkivonással jár, ami az ökoszisztémák tápanyagmérlegében veszteségként jelenik meg. Burger (1950), majd Heinsdorf és Krauß (1990) különböző fajokra dolgoztak ki tápelem-mennyiség becslési táblázatokat. Sokan vizsgálták, hogy az erdőművelési beavatkozások módja a tápelem-exporton keresztül milyen mértékben csökkentette a termőhely termőképességét (pl. Rennie 1955; Ulrich 1972; Ulrich et al. 1975; Kreutzer 1976, 1979; Krapfenbauer & Buchleitner 1981; Nebe & Herrmann 1987; Augusto et al. 2000).

A bükk tápelemtartalma

A bükk tápelemtartalmára vonatkozó első vizsgálatok elsősorban a faanyaggal foglalkoztak (Fiedler et al. 1973). A múlt század második felében számos mű jelent meg a bükk tápelemellátottságáról (pl. Pavlov 1972; Lyr et al. 1992, Hüttl 1992). Hazai bükkösökben Járó végezte az első és legátfogóbb vizsgálatokat (Járó & Horváthné 1960; Járó 1990). Számos további szerző is elemezte a makro- és mikroelemek koncentrációját a bükk kompartmentekben és az avarban (Füzesi et al. 1962; Tölgyesi 1965; Tölgyesi et al. 1968; Pántosné et al. 1983; Bidló 1995; Kalincsák 2002).

Járó (1990) a bükkösök tápanyagszükséglete és talajuk tápanyag-szolgáltató képessége közötti összefüggés megállapításával foglalkozott. Hegyvidéki tájakon (Visegrádi-hegység, Pilis-Budai-hegység, Magas-Bakony) kijelölt 10 különböző korú (6 és 120 év közötti) nudum-subnudum aljnövényzet-borítású bükkösben meghatározta a földfeletti szervek ill. kompartmentek tápelem-koncentrációját és -mennyiségét (N_2 , P_2O_5 , K_2O). Méréseivel kimutatta, hogy valamennyi terület átlagában a legnagyobb tápelem-koncentráció a fiziológiai szempontból legaktívabb levélzetben, majd a vékony ágakban (0-2 cm) mérhető, ezt követi csökkenő sorrendben a 2-5 cm-es, majd az 5 cm-nél vastagabb ág, végül pedig legalacsonyabb a tápelem-koncentráció a törzsben (1.3.-9. táblázat). A három fő tápelem (N_2 , P_2O_5 , K_2O) egymáshoz viszonyított aránya – amely fajspecifikus (Heinze & Fiedler 1992) – a levélzetben 66%, 7% és 27%, azaz jelentősen különbözik egymástól, ugyanakkor a vastagabb ágakban és a törzsben már kiegyenlítettebb a koncentrációjuk (39%, 28% és 33%). Az egyes mintafák tápelem-százalékainak tájankénti szórása szignifikánsan nem tért el a 10 vizsgált terület átlagfáinak szórásától. Ezek az eredmények tendenciájukat és nagyságrendjüket tekintve egybevágóak más, részben külföldön végzett kutatások eredményeivel.

1.3.-9. táblázat. A bükk szerveinek átlagos tápelem-koncentrációja és azok egymáshoz viszonyított arányai Járó (1990) nyomán

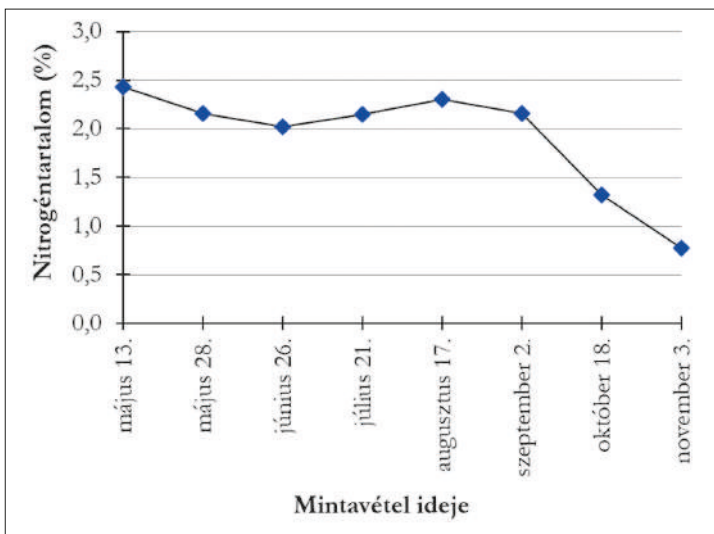
Kompartment		N_2	P_2O_5	K_2O
Levél	mg/g	23,5	2,5	9,6
	%	66	7	27
Ág, < 2 cm	mg/g	4,7	1,8	3,0
	%	49	19	32
Ág, 2-5 cm	mg/g	2,5	1,5	2,2
	%	40	24	36
Ág, > 5 cm	mg/g	2,0	1,2	1,7
	%	41	24	35
Törzs	mg/g	1,5	1,1	1,3
	%	39	28	33

A tápanyagellátottságot a belső tényezők mellett alapvetően a külső tényezők határozzák meg: a fény, a vízellátottság, az időjárás, a magassági fekvés, a talaj, az állományban elfoglalt helyzet (Lyr et al. 1992). A bükk levelek tápelemtartalmát meghatározza, hogy a levél fénynek kitett, vagy árnyalt helyen van a koronában (Fiedler et al 1973; Guha & Mitchell 1965, 1966). Levélfelületre vonatkoztatva a bükk fénynek kitett, vastagabb levelei több káliumot, kalciumot és magnéziumot tartalmaznak, mint az árnylevelek (Overdieck 1976). Kísérleti körülmények között az árnyalt csemetékben a legmagasabb a nitrogén-, kalcium- és kálium-tartalom. A foszfor ezzel ellentétesen viselkedik és legnagyobb koncentrációban a nem árnyalt csemeték levelében fordult elő (Burschel & Huss 1964).

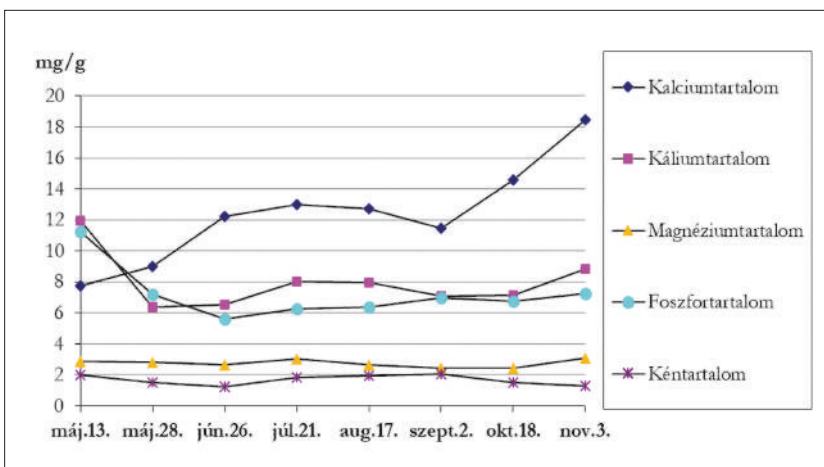
A vegetációs időszak alatt változik az egyes tápelemek koncentrációja. Guha és Mitchell (1965, 1966) a bükk levelekben a vegetációs idő alatt mért koncentrációk szempontjából a táp- ill. nyomelemek három csoportját különböztette meg. Az első csoport (Co, Ni, Fe, V, Ti, Cr, Pb és Al) koncentrációja a kifejlődési fázisban csökken, majd növekszik a maximumig, végül újra csökken. A második csoport elemei (Mn, B, Si, Ca, Sr, Ba, Mg) a vegetációs időszak alatt folyamatosan dúsulnak. A harmadik csoport elemei (Cu, Mo, Zn, P, K és Na) esetében a levelek tápelemtartalma a vegetációs időszak elején csökken, aztán viszonylag állandó szinten marad. A lomblevelek fajlagos tömege a vegetációs időszak folyamán, kalcium, szilícium és egyéb elemek beépülése miatt folyamatosan növekszik (Künstle & Mitscherlich 1975). A vegetációs időszak végére a bükk levelek nitrogén- és foszfortartalma fokozatosan csökken, így kedvezőbbnek tűnik a kálium és a kalcium ellátottság (Röhrig et al. 1978). A tápelemtartalom szezonális változásai miatt a levelek vizsgálatának időpontjául augusztust javasolják (Rzeznik & Nebe 1987), mivel július és augusztus vége között a bükk levelekben a raktározási folyamatok már egyensúlyban vannak. A levelek tápelemtartalma ebben az időszakban csak csekély mértékben változik (Le Tacon & Tutain 1973). Egyes szerzők szerint azonban nemcsak éves, hanem napi ritmussal is kell számolnunk a levelek tápelemtartalmában (Overdieck 1976).

Járó (1958) adatai megerősítik, hogy fakadáskor a levél nitrogéntartalma gyorsan eléri egy magas szintet, ami az augusztus-szeptemberi maximumig fokozatosan tovább nő, majd ezután hirtelen leesik (1.3.-21. ábra). Járó a magyarországi bükk állományokban a kálium- és foszfortartalomban nem tapasztalt nagy változást a vegetációs időszak alatt (Járó & Horváthné 1959). A többi táp- és nyomelem esetében sincs nagy változás a vegetációs időszakban (Bidló 1998; 1.3.-22. ábra).

Az ősszel lehulló lomb fő tápelemtartalma lényegesen kisebb, mint az év bármely más időszakában a zöld lombé. A kalcium-, a mangán- és alumínium-tartalom viszont (látszólag) jelentősen nő a levelekben a vegetációs időszak végére, mert a lombhullás előtt nem vándorolnak vissza a szárba (Járó & Horváthné 1959).



1.3.-21. ábra. Bükk levelek nitrogéntartalmának változása (Bidló 1998)



1.3.-22. ábra. Bükk levelek elemtartalmának változása (Bidló 1998)

A fontosabb tápelemek felvétele, körforgalma

A bükk közepes nitrogén-igényű fafajnak számít. A bükk avar nehezen bomlik, mivel a bomlás gyorsasága általában arányos az avar nitrogéntartalmával (Járó 1963). Viszont az utóbbi évtizedekben megnőtt nitrogén ülepedésből a bükk 5-6 kg/ha/év mennyiséget képes felvenni levelein keresztül. Ezzel egyidejűleg igen nagy

mennyiségű nitrogént szűr ki az állomány a légkörből, illetve mosódik ki a levelekből. Ezáltal bükk állományokban évente mintegy 29 kg nitrogén éri el a csapadékkal a talajt, ami 2,1-szerese a szabad területi ülepedésnek (Führer 1994b). Ezeket az adatokat a bükkösök tápanyagkörforgalmának vizsgálatakor nem lehet figyelmen kívül hagyni.

A bükk közepes *foszfor*igényű fafajnak számít. A talaj foszforellátottságának vizsgálatakor az avar foszfortartalma jobban tájékoztat, mint a felvehető foszfortartalom vizsgálat. A NH_4^+ ülepedés megnövekedése foszfor-szegény termőhelyeken a foszfát felvételét gátolhatja, így tápanyaghiány léphet fel (Hüttl 1991).

Egy soproni bükkös állományban megállapítható volt, hogy a szabadföldihez képest közel tízszeres mennyiség, azaz 31,4 kg *kálium* érte el a bükkösök talaját a törzsön át lefolyva és a leveleken átcsapogva (Führer 1994b). A többlet egy része a levelekből mosódott ki, másik része az állomány szűrőhatásának az eredménye. A kifejlődő levelekben, illetve növényekben nagyobb a kálium koncentráció, mint az idősekben.

A vizsgálatok alapján a *magnézium*hiány igen fontos szerepet játszott Nyugat-Európában a 80-as évektől fellépő „új típusú erdőkárak” kialakulásában (Berki 1991). Hazánkban a faállományok magnézium hiányával nem kell számolnunk. Szabadföldön, Sopron mellett, az éves magnéziumülepedés átlagosan 3,4 kg/ha, míg egy bükkösben 5,7 kg/ha volt (Führer 1994b).

A *kalcium* a transzspirációs árammal a csúcsok irányába vándorol és a levelekben halmozódik fel, mivel a visszavándorlás csekély (Járó & Horváthné 1960; Loch & Nosticzius 1983). A kalcium mennyisége az öregedő szervekben, elsősorban a hulló levelekben megnövekszik (Füzesi et al. 1962). A tavaszi lomb felét, negyedét tartalmazza az őszi mennyiségnek (Járó & Horváthné 1960). A levelek kalciumtartalma általában lényegesen nagyobb, mint a száré (Loch & Nosticzius 1983), az árnyalt csemetékben nagyobb a kalciumtartalom (Burschel & Huss 1964). A bükk alom viszonylag kevés kalciumot tartalmaz, de ezt a jelentős avarmennyiség kiegyenlíti (Járó & Horváthné 1960).

A bükk *mangán* tartalma tízszer nagyobb lehet, mint egyes lágyszárúaké, pl. a lucernáé (Tölgyesi 1965). A tápelem általában savanyú kémhatású körülmények között kimosódhat (Mengel 1976). Kétszikűek esetén mangánhiányra utal a fiatalabb levelek erei közötti sárga foltok megjelenése.

A talajok tápanyagellátottsága döntő módon befolyásolja az állományok anyagforgalmát. A fajok lombjának tápanyagtartalma a talajtól függően változik, optimális és az elégtelen tápanyagtartalomra vonatkozó adatokat hazánkban Járó és Horváthné (1960), ill. Járó (1963) közölt. Sajnos a későbbiekben ezek a vizsgálatok háttérbe szorultak, és csupán a 80-as évek végétől jelentek meg ismét ezzel kapcsolatos hazai mérési eredmények.

Bükkösök tápanyag-készlete és -szükséglete

Járó (1990) a vizsgált bükkösök szervesanyag-tömege és a tápelem-koncentrációk ismeretében számította a hektáronkénti élőfakészletbe és a levélzetbe beépült nitrogén-, foszfor- és káliumtartalmat, amelyek nagysága a földfeletti dendromassza tömegével arányosan nő. A mérések alapján tíz, különböző korú vizsgált faállomány 202 t/ha-os átlagos földfeletti dendromasszájába 444 kg nitrogén, 243 kg foszfor és 348 kg kálium épült be. A vizsgált bükkösök éves tápanyag-szükséglete általában a folyónövedékbe és az avar alkotóelemeibe beépülő tápelem-mennyiséggel egyenlő (1.3.-10. táblázat). A kapott értékeket összevetve a talajból felvehető makroelemek mennyiségével, a vizsgált állományokban nitrogénből 7-szeres, foszforból 125-szörös, káliumból pedig 87-szeres mennyiség állt rendelkezésre a talajban. A mért értékek alapján megállapítható, hogy a magyarországi bükkösök tápanyagokkal való ellátottsága nem számít minimum tényezőnek.

Az „Erdő–Klíma” kutatási program keretében 2003-ban meghatározták egy 70 éves bakonyi bükkös faállomány teljes (földfeletti és földalatti) szervesanyag- és tápelem-mennyiségét (N, P, Ca, Mg, K) (Führer & Jagodics 2009, 2024; Führer et al. 2011a). A vizsgált állomány leírása és adatai ugyanezen főfejezet »A szervesanyag-készlet összetétele« alfejezetében található.

1.3.-10. táblázat. Az éves tápelemszükséglet és a talaj termőréteg tápelemtartalmának átlagos értékei (kg/ha) hét vizsgált bükkös állományban (Járó 1990)

Tápelem	Évi folyónövedék tápelemtartalma	Évi avar tápelem tartalma	Faállomány éves tápelem szükséglete	Termőréteg felvehető tápelemtartalma
N ₂	43	61	104	698
P ₂ O ₅	16	10	26	3239
K ₂ O	24	18	42	3644

Az elemzés során a Járó (1990) méréseivel egyező arányokat (1.3.-9. táblázat) találták; ez esetben is az asszimilációs apparátusban, a levélzetben volt a legnagyobb a fajlagos tápelem-mennyiség (1.3.-11. táblázat). Európai irodalmi forrásmunkák bükkre vonatkozó átlagaihoz (N: 26,01; Ca: 8,88; K: 8,66; Mg: 1,25; P: 1,46 mg/g) képest az adatok a foszfor kivételével kissé magasabbak, de a szórásmezőn belül maradtak (Jacobsen et al. 2003). A lombzathoz tartozik a termés is, amely az endospermium miatt káliumban (8,20 mg/g), magnéziumban (0,84 mg/g) és foszforban (0,97 mg/g) gazdagabb, mint az egyéb szervek. A lombzatnál jóval alacsonyabbak az átlagos tápelem-koncentrációk az ágakban, és még alacsonyabbak a fatörzsek anyagában. Az élettanilag aktívabb vékony (0-1 cm) ágakban, hasonlóan Járó (1990) eredményeihez, a tápelem-koncentrációk jóval magasabbak, mint a vastagabb ágakban. A törzs esetében pedig a kéreg elemkoncentrációi magasabbak a törzs faanyag átlaghoz képest. A tuskó és a gyökérzet tápelem-koncentrációi valamivel magasabb értékeket mutatnak az ágakénál.

1.3.-11. táblázat. 70 éves bakonyi bükkös faállomány tápelem-koncentrációi (mg/g) a különböző növényi szervekben

Tápelem	Levél	Ág, 0-1 cm	Ág	Törzs	Kéreg	Tuskó és gyökérzet
N	28,88	7,81	3,49	1,85	6,84	5,47
Ca	10,18	8,19	2,63	1,85	23,75	3,84
K	9,33	4,57	1,74	1,44	2,85	1,81
Mg	1,77	0,67	0,37	0,23	0,48	0,93
P	1,17	0,65	0,28	0,12	0,29	0,38

A beépült tápelemek koncentrációinak és az adott bükkös szervesanyag-tömegének ismeretében számítható hektáronként az élőfakészletbe és a levélzetbe beépült fő tápelemek mennyisége (1.3.-12. táblázat). A mérések alapján a faállomány 481 t/ha-os átlagos földfeletti dendromasszájába 1149 kg nitrogén, 999 kg kalcium, 750 kg kálium, 131 kg magnézium és 78 kg foszfor épült be. Amíg a földfeletti dendromassza tömegének 77%-a a törzsekben, 22%-a az ágakban és kevesebb, mint 1%-a a lombzatban található, addig a fatörzsekbe a tápelemek összegzett mennyiségének csak 65%-a, az ágakba 29%-a, a lombzatba pedig csaknem 6%-a épült be. Ugyanakkor a közel 113 t/ha-nyi földalatti dendromasszában 609 kg nitrogén, 400 kg kalcium, 202 kg kálium, 105 kg magnézium és 42 kg foszfor található. E tápelem-készlet csaknem 88%-a a gyökérzetben, a maradék pedig a tuskókban halmozódott fel.

A földfeletti és a földalatti dendromassza szervesanyag-tömegének és összes tápelem-készletének összehasonlítása azt mutatja, hogy amíg a földfeletti dendromasszában a szervesanyagnak 81%-a, addig a tápanyagok összességének csak 70%-a található, azaz a földalatti dendromasszába fajlagosan több tápanyag épül be. Természetesen az egyes tápanyagok a fák szerveinek eltérő funkciói miatt más-más arányban akkumulálódnak a dendromasszában (1.3.-12. táblázat). Vagyis a mérések szerint a földalatti dendromasszában magasabb a nitrogén és a magnézium aránya, hasonló a foszforé, viszont alacsonyabb a kalcium és a kálium aránya.

Már említettük, hogy a faállományok tápelemkészlete és annak a fák egyes szerveiben való eloszlása több tényezőtől, így elsősorban a fafajtól és a termőhely termőképességétől függ. Összehasonlítottuk a bemutatott bükkös 1 évre eső adatait egy, ugyancsak bakonyi 51 éves cseres 1 évre eső adataival, mely utóbbi állomány ökológiai viszonyai talajtani szempontból kevésbé, klimatikus adottságaiban viszont jelentősen eltérnek a bükkösétől. A különbség mind a földfeletti dendromasszában, mind pedig a földalatti dendromasszában kifejeződik, de ellentétes irányban (1.3.-13. táblázat). A bükkös évenkénti átlagos szervesanyag-gyapapodása magasabb, mint a cseresé. Azonban amíg a bükkösben a földfeletti dendromasszában egyenletes növekedést feltételezve az éves szervesanyag-gyapapodás több, mint 1600 kg-mal nagyobb, addig a földalatti dendromasszában 730 kg-mal kisebb, mint a cseresben. Feltételezhető, hogy a fiatalkori gyökérfejlődés a cseresben intenzívebb, mint a bükkösben.

1.3.-12. táblázat. Egy bakonyi bükkös földfeletti és földalatti dendromasszájába beépült tápelemek mennyisége (kg/ha szárazanyagban)

Kompartment	Száraz- anyag	N	Ca	K	Mg	P	Összes tápelem
Levélzet	3 172	92	32	30	6	4	164
Ág	106 616	372	280	186	40	30	908
Törzs	371 017	685	687	534	85	44	2035
Földfeletti dendromassza	480 805	1 149	999	750	131	78	3 107
		37%	32%	24%	4%	3%	100%
Tuskó	39 997	64	36	56	8	4	168
Gyökér	72 763	545	364	146	97	38	1 190
Földalatti dendromassza	112 760	609	400	202	105	42	1 358
		45%	29%	15%	8%	3%	100%
Összes dendromassza	593 565	1 758	1 399	952	236	120	4 465

A tápanyag-összetétel és -készlet alakulása a két fafajban eltérő, vagyis amíg a bükkös dendromasszájába beépült tápanyagok egy évre jutó összegzett mennyisége összesen 61,4 kg, addig a cseresé több mint kétszer annyi, 126,2 kg (1.3.-13. táblázat). A mérési adatok egyértelműen mutatják, hogy a cseres egységnyi szervesanyag-képzéséhez szinte valamennyi tápelem tekintetében csaknem kétszeres mennyiséget igényel, mint a bükk. Feltételezhető ezért, hogy gyengébb termőképességű termőhelyeken álló középkorú cseresek utóbbi évtizedekben észlelhető egészségi állapot-romlásában a tápanyaghiány is szerepet játszhat.

A bemutatott eredmények ráirányítják a figyelmet a fafajok termőhelyigényének felülvizsgálatára, még akkor is, ha a magyarországi viszonyok mellett az erdei talajok tápanyag-ellátottsága kedvező. Amennyiben a 70 éves bükköst a vizsgálat időpontjában letermelték volna, akkor csak az ágak nélküli faanyag (törzsek) hasznosításával 685 kg nitrogén, 687 kg kalcium, 534 kg kálium, 85 kg magnézium és 44 kg foszfor került volna ki az erdő tápanyagforgalmából (1.3.-12. táblázat). A tartamos erdőgazdálkodás alapfeltétele ezért az, hogy a kitermelt faanyag tápanyagban gazdag részei, mint a levélzet és a vékonyabb ágak, valamint a gyökérzet az erdőterületen, az erdei ökoszisztéma tápanyag-körforgalmában maradjon.

1.3.-13. táblázat. A vizsgált bükkös és cseres éves átlagnövedéke szervesanyag- és tápelem-készletének földfeletti- és földalatti megoszlása, valamint a két faj közötti különbsége

Kompartment	Faj	Száraz- anyag	N	Ca	K	Mg	P	Összes
		kg/ha/év						
Földfeletti dendromassa lombozat nélkül	bükk	6823,3	15,1	13,8	10,3	1,8	1,0	42,0
	cser	5182,6	18,0	33,8	16,0	3,0	1,0	71,7
	diff.	1640,7	-2,9	-20,0	-5,7	-1,2	0,0	-29,7
Földalatti dendromassa	bükk	1610,8	8,7	5,7	2,9	1,5	0,6	19,4
	cser	2341,7	20,8	19,2	8,1	4,6	1,7	54,5
	diff.	-730,9	-12,1	-13,5	-5,2	-3,1	-1,1	-35,1
Összes dendromassa lombozat nélkül	bükk	8434,2	23,8	19,5	13,2	3,3	1,7	61,4
	cser	7524,3	38,9	53,0	24,1	7,6	2,7	126,2
	diff.	909,9	-15,1	-33,5	-10,9	-4,3	-1,0	-64,8

A bükkös avar- és humuszsztintje és az időjárás hatása

Führer Ernő és Jagodics Anikó

A 150–200 éves múltra visszatekintő, a szakszerű és tervszerű erdőgazdálkodást megalapozó tartamosági szemlélet mára nagymértékben átértékelődött. A klíma viszonylag gyors változása miatt az erdei ökoszisztémák energia- és anyagforgalmának kiegyensúlyozott állapota eltolódott, és ez rövid távon kihat a faállományok összetételére és növekedésére, de a humusz mennyiségére és minőségére is.

Az erdei ökoszisztémákban a fák elhalt levelei és ágai, valamint egyéb részei évente a talajra hullva avartakarót képeznek. Az ebből képződő humusz és a belőle felszabaduló tápanyagok az erdőtalaj termékenységének a forrása (Járó 1958, 1963). A bomlás olyan fizikai és kémiai folyamatokat foglal magában, amelyek lehetővé teszik az elhalt szervesanyag makromolekuláinak alapvető komponenseikre való redukálását (Aerts 1997), így a keletkezett CO₂ és az oldható tápanyagok újra felhasználhatókká válnak a növényzet számára (Cronan 2018). Nyilvánvaló, hogy a bomlási folyamatok lefolyása minden ökoszisztémában más és más (Zhang et al. 2008; Djukic et al. 2018). A lebomlási folyamatot elsősorban az időjárás, az avar kémiai összetétele és a talajban élő szervezetek befolyásolják (Coûteaux et al. 1995; Aerts 1997; Fierer et al. 2003). Amíg az ásványi talaj szénkészlet változásának folyamata nehezen modellezhető (passzív szénkészlet), addig az avartakaróban és a humuszsztintben megkötött szervesanyag (aktív szénkészlet) gyorsabban alakul át és a folyamat iránya és mértéke pontosabban becsülhető (McGill 1996). Magyarországi vizsgálatok alapján az erdők avartakarójában és a humuszsztintjében a szénkészlet nagysága átlagban elérheti a 10–15 t/ha értéket (Führer 2004, 2014; Führer & Jagodics 2009; Bidló 2014).

Az alábbi elemzésekben nem tárgyaljuk a *holtfák* faanyagának szerepét a humusz képződésben, mert mennyiségük esetleges és szoros összefüggésben van a bükkös állomány erdőkezelési előzményeivel. A faanyag lebontásának folyamata már a lábon száradt fákban elkezdődik, majd a földre dőlt törzsek bontása specialista rovarfajokkal és főleg korhasztó gombákkal folytatódik. A gombahifák növekedésének gyorsasága iránytól függően változó, axiális irányban a leggyorsabb, a bükk fájában axiális, radiális és tangenciális irányban 12,7:1,7:1,0 arányban változik (Traser 1996; 1.3.-23. ábra). A korhadó holtfa funkciója szervesanyag-tartalma mellett ökológiai és diverzitás-fenntartó szerepe révén kiemelkedő (Mátyás 1996; Csóka et al. 2000).



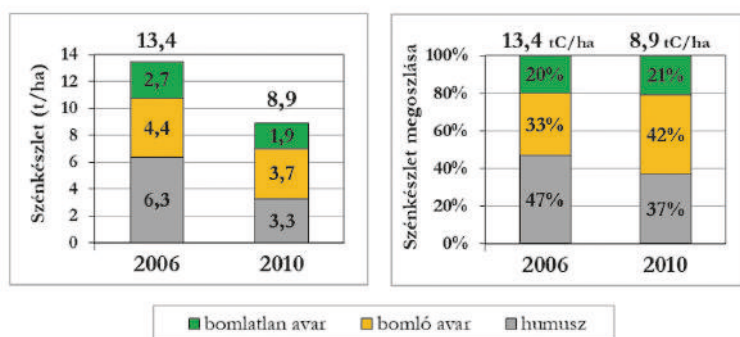
1.3.-23. ábra. A holtfa lebomlása hossztengetly mentén a leggyorsabb (Vétyemi ősbükkös; Fotó: Mátyás Csaba)

érték 9 t/ha körülire esett vissza. E nagymértékű fogyás elsősorban a humusz szénkészlet-csökkenésének (6,3 t/ha-ról 3,3 t/ha-ra) tulajdonítható, amely 48%-kal lett kevesebb. A változás 2006/2007 tele és 2010/2011 tele között eltelt 4 év alatt ment végbe. Ezért összehasonlították a 2007 elejétől 2010 végéig terjedő, és a 2003 elejétől 2006 végéig terjedő időszakok időjárási viszonyait és megállapították, hogy a 2007–2010-es időszakban a téli (január–február) és a kora tavaszi (március) hónapok átlaghőmérséklete 2,9 °C-kal, a csapadékösszege pedig 30%-kal volt több, mint 2003–2006 ugyanezen időszakának átlaga. Az éveket egyesével vizsgálva még markánsabb volt az eltérés 2007-ben, amikor január, február és március átlaghőmérséklete 5,3 °C-kal, a csapadékösszege pedig 52%-kal volt nagyobb a megelőző négyéves időszakhoz képest. Ez valószínűsíti, hogy a 2007. év rendkívüli időjárási viszonyainak volt köszönhető a változás. Más kutatások eredményeihez hasonlóan beigazolódni látszik, hogy a nedves és enyhe nyugalmi időszak a bomló avar és a humusz lebomlását elősegíti, a szárazabb viszonyok pedig gátolják, azaz lassítják a folyamatot (Járó 1963; Santonja et al. 2017).

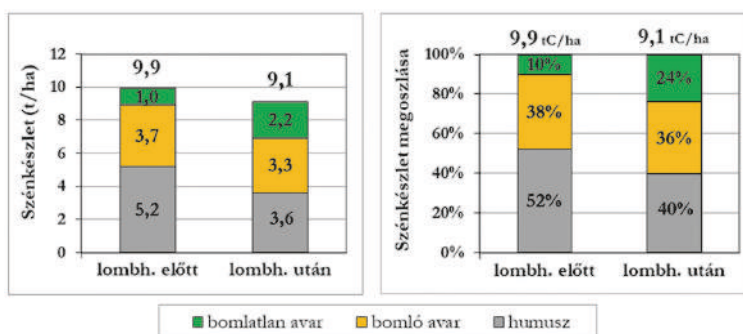
Jagodics és Führer (2023) hasonlóan gyors változást mértek 2013 őszén, amikor lombhullás előtt (szeptember végén) és után (december elején) gyűjtött avar- és humuszmintákat elemeztek. Az eredmények azt mutatták, hogy a bomlatlan avar szénmennyisége a lombhullás után több, mint kétszerese a lombhullás előttinek, ami

Dombvidéki körülmények

Több szerző szerint is az éghajlat vonatkozásában a hőmérséklet és a csapadék tekinthető olyan tényezőknek, melyek a bomlási sebességet befolyásolják (Parton et al. 2007), lassíthatják vagy gyorsíthatják a szervesanyagok lebomlását (Davidson & Janssens 2006; Coüteaux et al. 2002). Jagodics és Führer (2023) Magyarország két tipikus bükkös táján (Göcseji-dombság, Kelet-zalai-löszvidék) tanulmányozták az időjárás hatását az avar- és humuszszint tömegére. 2006-ban és 2010-ben 16 bükkös állományban lombhullást követően gyűjtött minták alapján (1.3.-24. ábra) megállapítható, hogy 2006-ban az avar és humuszréteg összes szénkészletének átlaga több, mint 13 t/ha volt, 2010-re viszont ez az



1.3.-24. ábra. Két év (2006 és 2010) lombhullás után gyűjtött avar- és humuszminták átlagos szénkészlete és annak megoszlása dombvidéki bükkösökben



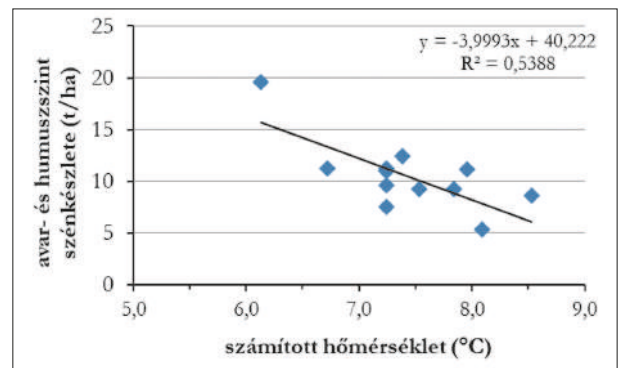
1.3.-25. ábra. 2013-ban lombhullás előtt és után gyűjtött avar- és humuszminták átlagos szénkészlete és annak megoszlása dombvidéki bükkösökben

természetes, míg a bomló avar szénkészlete valamivel kevesebb (1.3.-25. ábra). A humusz szénkészletváltozása pedig már $-1,6$ t/ha (-30%) volt. Mivel a humuszban az átlagos szénkoncentráció növekedett a lombhullás után, a készletcsökkenés a szervesanyag-tömeg fogyása miatt következett be, azaz intenzívebb lebomlás zajlott le. Ehhez kedvező feltételeket biztosított 2013 októberének és novemberének időjárása. Ebben az időszakban ugyanis a sokéves (1971–2020) átlaghoz viszonyítva $1,8$ °C-kal magasabb hőmérséklet és 56% -kal több csapadék jellemezte a vizsgált területeket, de még a szeptemberi csapadékösszeg is meghaladta ($+28\%$) a sokéves átlagot.

Hegyvidéki körülmények

Az erdei termőhelyek klímája a tengerszint feletti magasság emelkedésével arányosan hűvösebb és nedvesebb. Mivel hegyvidékeken a csapadék egyelőre elegendő mennyiségben áll rendelkezésre, ezért a hőmérsékletváltozás hatása sokkal erősebb az elhalt szervesanyag lebomlására, mint a csapadéké. A szárazabb termőhelyeken viszont a csapadék lehet az a termőhelyi tényező, ami a felhalmozódási és lebomlási folyamatokat befolyásolja. A Kőszegi-hegységben az éves átlaghőmérséklet 100 méterenként $0,58$ °C-kal csökken (Balázs et al. 2022). Amíg közel 900 m-es magasságban 6 °C körüli az éves átlaghőmérséklet, addig 400 m-en már csaknem eléri a 9 °C-ot. Korábbi vizsgálatokat komplexebben kiértékelve azt az eredményt kaptuk, hogy a hegységben 451 és 864 m között tenyésző 13 idős és középkorú bükkös állományban az avar- és humuszszint szén egyenértékben kifejezett átlagos tömege $10,6$ t (Führer 2014). Ennek 16% -a bomlatlan avar, 46% -a bomló avar, 38% -a pedig a humuszszint tömege. A két legalacsonyabban (451 és 529 m) fekvő állomány átlagos avar- és humuszszintjének tömege ($6,9$ t) a két legmagasabban (763 és 864 m) fekvő állomány átlagának ($15,4$ t) a felét sem éri el, vagyis a hőmérséklet csökkenésével arányosan növekszik az avar- és humuszszint szervesanyag-készlete (1.3.-26. ábra). A Kőszegi-hegységben 100 m-es szintkülönbség-emelkedés esetén a szénegyenértékben kifejezett avar- és humuszszint együttes tömege lineárisan $2,3$ tonnával emelkedik, ebből pedig csak a humuszszinté $1,3$ tonnával. A változások a hegység 400 m-t meghaladó magasságában a klímaváltozás vonatkozásában is extrapolálhatók.

Összegzésként, a magyarországi bükkösökben végzett avar- és humuszvizsgálatok eredményei alapján megállapítható, hogy a hűvösebb és nedvesebb hegyvidéki területeken a hőmérséklet-emelkedés, a melegebb dombvidékeken pedig a hőmérséklet-emelkedés, esetleges csapadék-növekedéssel párosulva, felgyorsíthatja a lebomlási folyamatokat, és ez a holt szervesanyag, különösen a humusz szénkészletének csökkenéséhez vezet. Ennek éven belüli mértéke meghaladhatja az erdő nettó szénmegkötő-képességét is, azaz az erdő ilyen esetben akár nettó szénkibocsátóvá válhat.



1.3.-26. ábra. Avar- és humuszszint szénkészletének lineáris változása a Kőszegi-hegység bükköseiben a tengerszint feletti magasság és hőmérsékleti gradiens alapján számított éves átlaghőmérsékletek függvényében

Irodalom

- Aerts R. 1997: Climate, leaf litter chemistry and leaf litter decomposition in terrestrial ecosystems: a triangular relationship. – *Oikos* 79: 439–449.
- Anev S. & Marinova A. 2021: Physiological adaptation of European beech (*Fagus sylvatica* L.) and wild cherry (*Prunus avium* L.) saplings after windthrow. – *Forestry Ideas* 27(2): 436–445.

- Augusto L., Ranger J., Ponette Q. & Rapp M. 2000: Relationships between forest tree species, stand production and stand nutrient amount. – *Annals of Forest Science* 57: 313–324.
- Backes K. & Leuschner C. 2000: Leaf water relations of competitive *Fagus sylvatica* and *Quercus petraea* trees during 4 years differing in soil drought. – *Canadian Journal of Forest Research* 30: 335–346.
- Balázs P., Berki I., Bidló A., Bölöni J., Horváth A., Király G. & Vig P. 2022: 43.1.2. Természetföldrajzi jellemzés. In: Führer E. (szerk.): Magyarország erdészeti tájai. V. Nyugat-Dunántúl erdészeti tájcsoport. – Agrárminisztérium Nemzeti Földügyi Központ, Budapest, pp. 174–186.
- Bartlett E.M. & Lewis D.H. 1971: Surface phosphatase activity of mycorrhizal roots of beech. – *Soil Biology and Biochemistry* 5: 249–257.
- Bauch J. & Schröder W. 1982: Zellulärer Nachweis einiger Elemente in den Feinwurzeln gesunder und erkrankter Tannen (*Abies alba* Mill.) und Fichten (*Picea abies* (L.) Karst.). – *Forstwissenschaftliches Centralblatt* 101: 285–294.
- Berki I. 1991: Die Rolle des Nährstoffmangels. – *Allgemeine Forstzeitung* 2: 74–78.
- Bidló A. 1995: Alaktani, életteni és tápanyagtartalmi összehasonlító vizsgálatok különböző származású bükk (*Fagus sylvatica* L.) csemétéken. – Doktori értekezés, Sopron, 110 pp.
- Bidló A. 1998: Egy bükk állomány anyagforgalmának vizsgálata. – OTKA Kutatási jelentés, Sopron, 25 pp.
- Bidló A. 2014: Erdei ökoszisztémák szénkészletének klímfüggő változása. In: Mátyás Cs. (szerk.): Agrárklíma: Az előrevetített klímaváltozás hatáselemzése és az alkalmazkodás lehetőségei. – Nyugat-magyarországi Egyetem Kiadó, Sopron, pp. 106–111.
- Biebelriether H. 1962: Wurzeluntersuchungen an Tannen und Eichen in Mittelschwaben. – *Forstwissenschaftliches Centralblatt* 82: 210–248.
- Bognár K.R. & Vig P. 2004: A sugárzasi egyenleg faállományon belüli változásai egy bükkösben. In: Mátyás Cs. & Vig P. (szerk.): Erdő és klíma IV. – NyME, Sopron, pp. 133–143.
- Bolla B., Manninger M., Molnár T., Horváth B., Szolgay J., Gribovszki Z., Kalicz P. & Szabó A. 2024: Evaluation of the Compound Effects of the 2022 Drought and Heatwave on Selected Forest Monitoring Sites in Hungary in Relation to Its Multi-Year Drought Legacy. – *Forests* 15: 941.
- Bowen I.S. 1926: The ratio of heat losses by conduction and by evaporation from any water surface. – *Physical Review* 27(6): 779–787.
- Burger H. 1950: Holz, Blattmenge und Zuwachs. X. Mitteilung: Die Buche. – *Mitteilungen der Schweizerischen Anstalt für das Forstliche Versuchswesen* 26(2): 419–468.
- Burschel P. & Huss J. 1964: Die Reaktion von Buchensämlingen auf Beschattung. – *Forstarchiv* 35(11): 225–233.
- Cannell M.G.R. & Willett S.C. 1976: Shoot growth phenologie, dry matter distribution and root/shoot ratios of provenances of *Populus trichocarpa*, *Picea sitchensis* and *Pinus contorta* growing in Scotland. – *Silvae Genetica* 25(2): 49–59.
- Carlyle-Moses D. E. & Schooling J.T. 2015: Tree traits and meteorological factors influencing the initiation and rate of stemflow from isolated deciduous trees. – *Hydrological Processes* 29(18): 4083–4099.
- Collignon C., Calvaruso C. & Turpault M. 2011: Temporal dynamics of exchangeable K, Ca and Mg in acidic bulk soil and rhizosphere under Norway spruce (*Picea abies* Karst.) and beech (*Fagus sylvatica* L.). – *Plant and Soil* 349: 89–94.
- Coûteaux M.M., Bottner P. & Berg B. 1995: Litter decomposition, climate and litter quality. – *Trends in Ecology & Evolution* 10: 63–66.
- Coûteaux M.M., Sarmiento L., Bottner P., Acevedo D. & Thiéry J. 2002: Decomposition of standard plant material along an altitudinal transect (65–3968 m) in the tropical Andes. – *Soil Biology and Biochemistry* 34: 69–78.
- Cronan C.S. 2018: Ecosystem Biogeochemistry: Element Cycling in the Forest Landscape. – Faculty and Staff Monograph Publications 285., Springer Cham, 205 pp.
- Čufar K., Prislán P., de Luis M. & Gričar J. 2008: Tree-ring variation, wood formation and phenology of beech (*Fagus sylvatica*) from a representative site in Slovenia, SE Central Europe. – *Trees* 22(6): 749–758.
- Czajkowski T., Kompa T. & Bolte A. 2006: Zur Verbreitungsgrenze der Buche (*Fagus sylvatica* L.) im nordöstlichen Mitteleuropa. – *Forstarchiv* 77: 203–216.
- Czúcz B., Gálhidy L. & Mátyás Cs. 2013: A bükk és a kocsánytalan tölgy elterjedésének szárazsági határa. – *Erdészettudományi Közlemények* 3(1): 39–53.
- Csáki P. 2020: A klímaváltozás hatása a vízkészletekre a felszínborítás figyelembevételével. – Doktori (PhD.) értekezés, Sopron, 122 pp.
- Csóka Gy., Dobrosi D., Frank T., Kovács T. & Traser Gy. 2000: Az elpusztult, korhadó fa szerepe az erdei biodiverzitás fenntartásában. In: Frank T. (szerk.) 2000: Természet-Erdő-Gazdálkodás. – MME-Pro Silva Hungarica Kiadványa, Garamond Kft., Eger, pp. 85–98.

- Davidson E.A. & Janssens I.A. 2006: Temperature sensitivity of soil carbon decomposition and feedbacks to climate change. – *Nature* 440: 165.
- Deans J.D. 1979: Fluctuations of the soil environment and fine root growth in young Sitka spruce plantation. – *Plant and Soil* 52: 195–208.
- Decuyper M., Chávez R.O., Čufar K., Estay S.A. ... Sass-Klaassen U. 2020: Spatio-temporal assessment of beech growth in relation to climate extremes in Slovenia – An integrated approach using remote sensing and tree-ring data. – *Agricultural and Forest Meteorology* 287: 1–10.
- Dengler A. 1944: *Waldbau auf ökologischer Grundlage*. 3. Auflage – Springer, Berlin, 608 pp.
- Di Filippo A., Biondi F., Čufar K., de Luis M. ... Piovesan G. 2007: Bioclimatology of beech (*Fagus sylvatica* L.) in the Eastern Alps: spatial and altitudinal climatic signals identified through a tree-ring network. – *Journal of Biogeography* 34(11): 1873–1892.
- Dittmar C., Zech W. & Elling W. 2003: Growth variations of common beech (*Fagus sylvatica* L.) under different climatic and environmental conditions in Europe – a dendroecological study. – *Forest Ecology and Management* 173(1-3): 63–78.
- Djukic I., Kepfer-Rojas S., Schmidt I., Larsen K., Beier C., Berg B., Verheyen K., Caliman A., Paquette A. & Gutiérrez-Girón A. 2018: Early stage litter decomposition across biomes. – *Science of the Total Environment* 628: 1369–1394.
- Ebert H.P. 2003: *Die Behandlung von häufig vorkommenden Baumarten*. 3. Auflage. – Schriftenreihe Fachhochschule Rottenburg am Neckar, Hochschule für Forstwirtschaft.
- Edelényi M., Pödör Z. & Jereb L. 2011: Transzformált adatsorok alkalmazása a fák növekedése és az időjárási paraméterek kapcsolatának vizsgálatában. – *Agrárinformatika* 2(1): 39–48.
- Eichhorn J. 1992: Wurzeluntersuchungen an sturmgeworfenen Bäumen in Hessen. – *Forst und Holz* 47(18): 555–559.
- Ellenberg H. 1988: *Vegetation ecology of Central Europe*. 4th ed. – Cambridge University Press, 731 pp.
- Ellenberg H. 1996: *Vegetation Mitteleuropas mit den Alpen: in ökologischer, dynamischer und historischer Sicht*. 5. Auflage. – Ulmer, Stuttgart, 1095 pp.
- Ellenberg H., Mayer R. & Schaueremann J. 1986: *Ökosystemforschung: Ergebnisse des Solling-Projekts 1966–1986*. – Ulmer Verlag, Stuttgart, 507 pp.
- Faragó S. 1960: Homoki cserjék gyökérfeltárása. – *Erdészeti Kutatások* 56(1–3): 341–360.
- Faragó S. 1972: Investigations on the growth rate of Austrian pine (*Pinus nigra*) roots and side branches. – *Erdészeti Kutatások* 68(2): 155–176.
- Fiedler H.J., Nebe W. & Hoffmann F. 1973: *Forstliche Pflanzenernährung und Düngung*. – Gustav Fischer Verlag, Stuttgart, 481 pp.
- Fierer N., Allen A.S., Schimel J.P. & Holden P.A. 2003: Controls on microbial CO₂ production: a comparison of surface and subsurface soil horizons. – *Global Change Biology* 9: 1322–1332.
- Fraser D.A. 1962: Tree growth in relation to soil moisture. In: Kozłowski T.T. (ed.): *Tree growth*. – The Ronald Press, New York, pp. 183–204.
- Führer E. 1984: A csapadék megoszlása és az intercepció különböző hazai erdőtársulásokban. – *Doktori értekezés, Sopron*, 180 pp.
- Führer E. 1992: Intercepció meghatározása bükk, kocsánytalan tölgy és lucfenyő erdőben – *Vízügyi Közlemények* 74(3): 281–294.
- Führer E. 1994a: Csapadékmérések bükkös, kocsánytalan tölgyes és lucfenyves ökoszisztémában – *Erdészeti Kutatások* 84: 11–35
- Führer E. 1994b: Bükkös, kocsánytalan tölgyes és lucfenyves csapadékvíz- és csapadékvízben oldott tápanyagbevétele. – *Kandidátusi értekezés, Sopron*, 103 pp.
- Führer E. 1995: Az időjárás változásának hatása az erdők fatermőképességére és egészségi állapotára. – *Erdészeti Lapok* 130(6): 176–178.
- Führer E. 2002: A klímátényezők és a klímajelző fajok szervesanyag-képzése közötti ökológiai összefüggés. – „Erdő-Klíma” kutatási program, zárójelentés, NKFP 3/B/0012/2002 (kéziratban).
- Führer E. 2004: Carbon fixing capacity of the forests in Hungary. – *Hungarian Agricultural Research* 13(3): 4–7.
- Führer E. 2010: A fák növekedése és a klíma. – „KLÍMA-21” Füzetek 61: 98–107.
- Führer E. 2014: A talaj szervesanyag-tartalmának (avar, humusz, ásványi talaj) zonalitással összefüggő változása. In: Mátyás Cs. (szerk.): *Agrárklíma: Az előrevetített klímaváltozás hatáselemzése és az alkalmazkodás lehetőségei*. – Nyugat-magyarországi Egyetem Kiadó, Sopron, pp. 102–106.
- Führer E. 2018: A klímaértékelés erdészeti vonatkozásai. – *Erdészettudományi Közlemények* 8(1): 27–42.

- Führer E., Czupy Gy., Kocsisné Antal J. & Jagodics A. 2011a: Gyökérvizsgálatok bükkös, gyertyános-kocsányos tölgyes és cseres faállományban. – *Agrokémia és Talajtan* 60(1): 103–118.
- Führer E., Csiha I., Szabados I., Pödör Z. & Jagodics A. 2014: Egy cseres faállomány földfeletti és földalatti szervesanyagának meghatározása. – *Erdészettudományi Közlemények* 4(2): 109–119.
- Führer E., Edelenyi M., Horváth L., Jagodics A. ... Pödör Z. 2016a: Effect of weather conditions on annual and intra-annual basal area increments of a beech stand in the Sopron Mountains in Hungary. – *Időjárás* 120(2): 127–161.
- Führer E., Edelenyi M., Jagodics A., Jereb L. ... Pödör Z. 2016b: Az időjárás hatása egy időskorú bükkös évenkénti körlap-növekedésére. – *Erdészettudományi Közlemények* 6(1): 61–78.
- Führer E., Horváth L., Jagodics A., Machon A. & Szabados I. 2011b: Application of a new aridity index in Hungarian forestry practice. – *Időjárás* 115(3): 205–216.
- Führer E. & Jagodics A. 2009: A klímajelző fafajú állományok szénkészlete. – *„Klíma-21” Füzetek* 57: 43–55.
- Führer E. & Jagodics A. 2024: Bükkös, gyertyános-kocsányos tölgyes és cseres faállományok tápanyagkészlete. – Kézirat, 10 pp.
- Führer E., Jagodics A., Juhász I., Marosi G. & Horváth L. 2013: Ecological and economical impacts of climate change on Hungarian forestry practice. – *Időjárás* 117(2): 159–174.
- Führer E., Járó Z. & Márkus L. 1991: A magyarországi erdők szénmegkötő képessége. In: Faragó T., Iványi Zs. & Szalai S. (szerk.): *Az éghajlat változékonysága és változása II. – Környezetvédelmi és Területfejlesztési Minisztérium – Országos Meteorológiai Szolgálat, Budapest*, pp. 67–73.
- Füzesi I., Nemky E. & Vancsura R. 1962: Hulló lomb Ca-tartalmának vizsgálata, tekintettel a soproni hegyvidék savanyú talajaira. – *Erdészettudományi Közlemények* 2: 151–159.
- Garamszegi B. & Kern Z. 2014: Climate influence on radial growth of *Fagus sylvatica* growing near the edge of its distribution in Bükk Mts., Hungary. – *Dendrobiology* 72: 93–102.
- Garamszegi B. & Kern Z. 2016: Hazai bükkösök körlap-növekedésének trendjei a változó klíma tükrében. – *Erdészettudományi Közlemények* 6(1): 35–44.
- Glatzel K. 1961: Wurzel Ausbildung der wichtigen Wirtschaftsholzarten auf sandig-tonigen Keuperböden. – *Allgemeine Forstzeitschrift für Waldwirtschaft und Umweltvorsorge* 16(8): 140–144., (9): 167–170.
- Glock W.S. & Agertier S.R. 1962: Rainfall and tree growth. In: Kozłowski T.T. (ed.): *Tree growth*. – The Ronald Press, New York, pp. 23–56.
- Göttsche D. 1972: Verteilung von Feinwurzeln und Mykorrhizen im Bodenprofil eines Buchen- und Fichtenbestandes im Solling. – *Mitteilungen der Bundesforschungsanstalt für Forst- und Holzwirtschaft Nr. 88., Reinbek bei Hamburg*, 102 pp.
- Gribovszki Z., Kalicz P. & Kucsara M. 2006: Streamflow Characteristics of Two Forested Catchments in Sopron Hills – *Acta Silvatica et Lignaria Hungarica* 2: 81–92.
- Gruber F. 2002: Wachstum von Altbuchen (*Fagus sylvatica* L.) auf einem Kalkstandort (Göttinger/Södlicher) in Abhängigkeit von der Witterung. III. Bohrkernanalysen. – *Allgemeine Forst- und Jagdzeitung* 173: 117–122.
- Gruber F. 2004: Die Steuerung des sogenannten „Blattverlust” der Buche (*Fagus sylvatica* L.) durch die Witterung. – *Allgemeine Forst- und Jagdzeitung* 175: 83–94.
- Guha M.M. & Mitchell R.L. 1965: The trace and major element composition of the leaves of some deciduous trees. I. Sampling techniques. – *Plant and Soil* 23: 323–338.
- Guha M.M. & Mitchell R.L. 1966: The trace and major element composition of the leaves of some deciduous trees. II. Seasonal changes. – *Plant and Soil* 24: 90–112.
- Gutiérrez E., Campelo F., Camarero J.J., Ribas M., Muntán E., Nabais C. & Freitas H. 2011: Climate controls act at different scales on the seasonal pattern of *Quercus ilex* L. stem radial increments in NE Spain. – *Trees* 25: 637–646.
- Hackett-Pain A.J., Friend A.D., Lagueard J.G.A. & Thomas P.A. 2015: The influence of masting phenomenon on growth–climate relationships in trees: explaining the influence of previous summers’ climate on ring width. – *Tree Physiology* 35(3): 319–330.
- Heinsdorf D. & Krauß H.-H. 1990: Schätztafeln für Trockenmasse und Nährstoffspeicherung von Kiefernbeständen. IFE-Berichte aus Forschung und Entwicklung 18. – Institut für Forstwissenschaften, Eberswalde, 77 pp.
- Heinze M. & Fiedler H.J. 1992: Ernährung der Gehölze. In: Lyr H., Fiedler H.J. & Tranquillini W. (eds.): *Physiologie und Ökologie der Gehölze*. – Gustav Fischer Verlag, Jena–Stuttgart, pp. 43–115.
- Horváth A. & Mátyás Cs. 2014: Növekedéscsökkenés előrevetítése egy bükk származási kísérlet alapján. – *Erdészettudományi Közlemények* 4(2): 91–99.
- Horváth A. & Mátyás Cs. 2016: The Decline of Vitality Caused by Increasing Drought in a Beech Provenance Trial, Predicted by Juvenile Growth. – *South-east European Forestry* 7(1): 21–28.

- Hüttl R. 1991: Die Nährelementversorgung geschädigter Wälder in Europa und Nordamerika. – Freiburger Bodenkundliche Abhandlungen 28: 1–440.
- Hüttl R. 1992: Die Blattanalyse als Diagnose- und Monitoringinstrument in Waldökosystemen. – Freiburger Bodenkundliche Abhandlungen 30: 31–59.
- Ijjász E. 1936: A nyersalomtakaró szerepe az erdők vízháztartásában – Hidrológiai Közlöny 16: 72–101.
- Illinszkij A.P. 1937: Rasztyityelnoszty zemnogo sara [A Föld vegetációja.]. – Moszkva-Leningrád. Cit. in: Czajkowski T., Kompa T. & Bolte A. 2006: Zur Verbreitungsgrenze der Buche (*Fagus sylvatica* L.) im nordöstlichen Mitteleuropa. – Forstarchiv 77: 203–216.
- Illés G. & Fonyó T. 2016: A klímaváltozás fatermesre gyakorolt várható hatásának becslése az AGRATÉR projektben. – Erdészettudományi Közlemények 6(1): 25–34.
- Jacobsen C., Rademacher P., Meesenburg H. & Meiwes K.J. 2003: Gehalte chemischer Elemente in Baumkompartimenten: Literaturstudie und Datensammlung. Berichte des Forschungszentrums Waldökosysteme, Reihe B, Band 69. – Universität Göttingen, 81 pp.
- Jagodics A. & Führer E. 2023: Klímaváltozás hatása az erdő avar- és humuszrétegének szervesanyag mennyiségére és minőségére zalai bükkösök példáján. In: Koncz I. & Szova I. (szerk.): Húsz éve az európai nemzeti tudományosság és a fiatal kutatók szolgálatában. A PEME XXVI. Nemzetközi PhD-Konferenciájának előadásai (Budapest, Miskolc, 2023. november). – Professzorok az Európai Magyarországiért Egyesület, Budapest–Miskolc, pp. 81–91.
- Jahn G. 1991: Temperate deciduous forests of Europe. Ecosystems of the world 7. In: Röhrig E. & Ulrich B. (eds.): Temperate deciduous forests. – Elsevier, London, pp. 377–502.
- Járó Z. 1958: Alommennyiségek a magyar erdő egyes típusaiban. – Erdészettudományi Közlemények 1: 151–159.
- Járó Z. 1963: A lomb bomlása különböző állományok alatt. – Erdészeti Kutatások 59(1–2): 95–104.
- Járó Z. 1972: A termőhely fogalma. In: Danszky I. (szerk.): Erdőművelés I. – Mezőgazdasági Kiadó, Budapest, pp. 47–87.
- Járó Z. 1979: A kultúrerdők ökoszisztéma-vizsgálata. – MTA Veszprémi Akadémiai Bizottsága Monográfiái 10: 40–45.
- Járó Z. 1980: Intercepció a Gödöllői kultúrerdei ökoszisztémában. – Erdészeti Kutatások 73: 7–17.
- Járó Z. 1981: A hazai erdők vízfogyasztása. – Agrártudományi Közlemények 40: 353–356.
- Járó Z. 1990: A bükkösök szerves- és tápanyagforgalma. – Erdészeti Kutatások 80–81: 83–98.
- Járó Z. 1991: Lomberdők gyökérrendszere és gyökértömege. – Erdészeti és Faipari Tudományos Közlemények 1991(1): 5–22.
- Járó Z. 1995: A legfontosabb magyarországi természetserű, származék és kultúr erdőtársulások évi szervesanyagképzése. – Kutatási jelentés az 1385. számú OTKA pályázatról.
- Járó Z. & Horváth E.-né 1959: Tápanyag-körforgalom a magyar erdő egyes típusaiban. – Erdészeti Kutatások 6(1–2): 231–246.
- Járó Z. & Horváth E.-né 1960: Az alom kalciumtartalma és jelentősége. – Erdészeti Kutatások 7(1–3): 99–103.
- Járó Z. & Tátraaljai E.-né 1985: A fák éves növekedése. – Erdészeti Kutatások 76–77: 221–234.
- Johnson P.S., Novinger S. & Mares W. 1984: Root, shoot, and leaf area growth potentials of northern red oak planting stock. – Forest Science 30(4): 1017–1026.
- Jones H.G. 2014: Plants and Microclimate. A Quantitative Approach to Environmental Plant Physiology. Third Edition. – Cambridge University Press, 250 pp.
- Kalela E. 1949: On the horizontal roots in pine and spruce stands I. – Acta Forestalia Fennica 57(2): 62–68.
- Kalicz P., Herceg A., Kisfaludi B., Csáki P. & Gribovszki Z. 2017: Canopy interception variability in changing climate – EGU General Assembly 2017, Vienna, Geophysical Research Abstracts, p. 19.
- Kalincsák P. 2002: Bükk állományok tápanyag-ellátottságának értékelése. – Diplomamunka, Nyugat-Magyarországi Egyetem, Sopron, 50 pp.
- Kollár T. 2022: A bükk (*Fagus sylvatica*) állományok fatermesési függvénye és táblája az ERTI tartamkísérleti hálózatának adatbázisa alapján. – Erdészettudományi Közlemények 12(1–2): 5–29.
- Kolozsár J. 1981: Ökoszisztéma-vizsgálatok eredményeiről. – Erdészeti és Faipari Tudományos Közlemények 1981(1): 81–90.
- Köcher P., Gebauer T., Horna V. & Leuschner C. 2009: Leaf water status and stem xylem flux in relation to soil drought in five temperate broad-leaved tree species with contrasting water use strategies. – Annals of Forest Science 66: 101.
- Köppen F.T. 1889: Geographische Verbreitung der Holzgewächse des Europäischen Russlands und des Kaukasus. Vol. 2. – Druckerei der Kaiserlichen Akademie der Wissenschaften, St Petersburg, 614 pp.
- Köstler J.N., Brückner E. & Biebelriether H. 1968: Die Wurzeln der Waldbäume. – Verlag Paul Parey, Hamburg–Berlin, 284 pp.

- Kramer P.J. 1962: The role of water in tree growth. In: Kozłowski T.T. (ed.): Tree growth. – The Ronald Press, New York, pp. 171–182.
- Krapfenbauer A. & Buchleitner E. 1981: Holzernte, Biomassen- und Nährstoffaustrag, Nährstoffbilanz eines Fichtenbestandes. – Centralblatt für das gesamte Forstwesen 98: 193–223.
- Kreutzer K. 1961: Wurzelbildung junger Waldbäume auf Pseudogleyböden. – Forstwissenschaftliches Centralblatt 80: 356–392.
- Kreutzer K. 1976: Effect on growth in next rotation (regeneration). In: Joint ECE, FAO and ILO Symposium on the Harvesting of a Larger Part of the Forest Biomass. Hyvinkää, Finland, 14–16 June 1976, Proceedings. – UN/ECE, pp. 78–90.
- Kreutzer K. 1979: Ökologische Fragen zur Vollbaumernte. – Forstwissenschaftliches Centralblatt 98: 298–308.
- Kucsara M. 1996: Csapadék és lefolyás erdészeti kisvizgyűjtőn. – Doktori értekezés, Sopron, 120 pp.
- Kucsara M. 1998: Az erdő csapadékviszonyainak vizsgálata. – Vízügyi Közlemények 80(3): 456–475.
- Künstle E. & Mitscherlich G. 1975: Photosynthese, Transpiration und Atmung in einem Mischbestand im Schwarzwald. I. Teil: Photosynthese. – Allgemeine Forst- und Jagdzeitung 146(3–4): 45–63.
- Laitakari E. 1929: Die Wurzelforschung in ihrer Beziehung zur praktischen Forstwirtschaft. – Acta Forestalia Fennica 33(2): 1–22.
- Langlois C.G., Godbout L. & Fortin J.A. 1983: Seasonal variation of growth and development of the roots of five second year conifer species in the nursery. – Plant and Soil 71: 55–62.
- Le Tacon F. & Toutain F. 1973: Variations saisonnières et stationnelles de la teneur en éléments minéraux des feuilles de hêtre (*Fagus sylvatica*) dans l'Est de la France. – Annales des Sciences Forestières 30(1): 1–29.
- Lebourgeois F., Bréda N., Ulrich E. & Granier A. 2005: Climate – tree-growth relationships of European beech (*Fagus sylvatica* L.) in the French permanent plot network (RENECOFOR). – Trees 19: 385–401.
- Leibundgut H., Dafis S. & Richard F. 1963: Untersuchungen über das Wurzelwachstum verschiedener Baumarten. – Schweizerische Zeitschrift für Forstwesen 114(11): 621–646.
- Leiningen-Westerburg W. 1934: Edaphische Faktoren. In: Rubner K. (ed.): Die pflanzengeographischen Grundlagen des Waldbaus. Dritte Auflage. – Verlag J. Neumann-Neudamm, pp. 152–259.
- Leuschner C. 2020: Drought response of European beech (*Fagus sylvatica* L.) A review. – Perspectives in Plant Ecology, Evolution and Systematics 47: 12557.
- Levia D.F. & Frost E.E. 2003: A review and evaluation of stemflow literature in the hydrologic and biogeochemical cycles of forested and agricultural ecosystems. – Journal of Hydrology 274: 1–29.
- Levia D.F. & Herwitz S.R. 2005: Interspecific variation of bark water storage capacity of three deciduous tree species in relation to stemflow yield and solute flux to forest soils. – Catena 64: 117–137.
- Liming F.G. 1957: Homemade dendrometers. – Journal of Forestry 55(8): 575–577.
- Loch J. & Nosticzius Á. 1983: Alkalmazott kémia. – Mezőgazdasági Kiadó, Budapest, 363 pp.
- Lyr H., Fiedler H.J. & Tranquillini W. (eds.) 1992: Physiologie und Ökologie der Gehölze. – Gustav Fischer Verlag, Jena–Stuttgart, 620 pp.
- Lyr H. & Hoffmann G. 1992: Wachstum – Einflussfaktoren. In: Lyr H., Fiedler H.-J. & Tranquillini W. (eds.): Physiologie und Ökologie der Gehölze. – Gustav Fischer Verlag, Jena–Stuttgart, pp. 397–438.
- Lyr H., Hoffmann G. & Dohse K. 1963: Über den Einfluss unterschiedlicher Beschattung auf die Stoffproduktionen von Jungpflanzen einiger Waldbäume. 1. Mitteilung. – Flora (Jena) 153(2): 291–311.
- Lyr H., Hoffmann G. & Engel W. 1964: Über den Einfluss unterschiedlicher Beschattung auf die Stoffproduktionen von Jungpflanzen einiger Waldbäume. 2. Mitteilung. – Flora (Jena) 155(2): 305–330.
- Magyar P. 1929: Gyökérvizsgálatok csemetekerti és szikes talajban. – Erdészeti Kísérletek 31(2): 117–165.
- Magyar P. 1961: Gyökérvizsgálatok. In: Magyar P. (szerk.): Alföldfásítás II. – Akadémiai Kiadó, Budapest, pp. 86–104.
- Majer A. 1958: Bükk erdőtípusok gyökérszint-vizsgálata. – MTA Agrártudományok Osztálya Közleményei 14(1–3): 117–134.
- Manninger M. 2004: Erdei fák éves és korszaki növekedésmenete és kapcsolódása egyes ökológiai tényezőkhez. In: Mátyás Cs. & Vig P. (szerk.): Erdő és klíma IV. – Nyugat-Magyarországi Egyetem, Sopron, pp. 151–162.
- Manninger M., Edelényi M., Pödör Z. & Jereb L. 2011: Alkalmazott elemzési módszerek a környezeti tényezők fák növekedésére gyakorolt hatásának vizsgálatában. – Erdészettudományi Közlemények 1(1): 59–70.
- Mansfield T.A. 1988: Factors determining root-shoot partitioning. In: Cape J.N. & Mathy P. (eds.): Scientific Basis of Forest Decline Symptomatology. – Commission of the European Communities, Edinburgh, Scotland, pp. 172–181.
- Marjanović H., Alberti G., Balogh J., Czóbel Sz., Horváth L., Jagodics A., Nagy Z., Ostrogović M.Z., Peressotti A. & Führer E. 2011: Measurements and estimations of biosphere-atmosphere exchange of greenhouse gases – Forests.

- In: Haszpra L. (ed.): Atmospheric Greenhouse Gases: The Hungarian Perspective. – Springer Science+Media B.V., Dordrecht–Heidelberg–London–New York, pp. 121–156.
- Mátyás Cs. (szerk.) 1996: Erdészeti ökológia. – Mezőgazda Kiadó, Budapest, 312 pp.
- Mátyás Cs. (szerk.) 2018: A klímaváltozás kihívásai az erdészetben. – Erdészettudományi Közlemények 8(1): (különszám), 264 pp.
- Mátyás Cs., Berki I., Czúcz B., Gálos B., Móricz N. & Rasztoivits E. 2010: Future of beech in Southeast Europe from the perspective of evolutionary ecology. – Acta Silvatica et Lignaria Hungarica 6: 91–110.
- Mátyás Cs. & Czimber K. 2000: Zonális erdőtakaró mezoklíma szintű modellezése: lehetőségek a klímaváltozás hatásainak előrejelzésére. In: Tar K (szerk.): III. Erdő és Klíma Konferencia. – DE TTK Meteorológia Tanszék, Debrecen, pp. 83–97.
- Mayr H. 1925: Waldbau auf naturgesetzlicher Grundlage. – Paul Parey, Berlin, 568 pp.
- McGill W.B. 1996: Review and classification of ten soil organic matter (SOM) models. In: Powlson D.S., Smith P. & Smith J.U. (eds.): Evaluation of soil organic matter models. – Springer Verlag, Berlin, pp. 111–132.
- Meier I.C. & Leuschner C. 2008: Leaf size and leaf area index in *Fagus sylvatica* forests: competing effects of precipitation, temperature, and nitrogen availability. – Ecosystems 11: 655–669.
- Mengel K. 1976: A növények táplálkozása és anyagcseréje. – Mezőgazdasági Kiadó, Budapest, 365 pp.
- Metzger J. C., Filipzik J., Michalzik B. & Hildebrandt A. 2021: Stemflow Infiltration Hotspots Create Soil Microsites Near Tree Stems in an Unmanaged Mixed Beech Forest. – Frontiers For Global Change 4: 701293.
- Meyer F.H. 1987: Der Verzweigungsindex, ein Indikator für Schäden am Feinwurzelsystem. – Forstwissenschaftliches Centralblatt 106: 84–92.
- Möller C.M., Müller D. & Nielsen J. 1954: Ein Diagramm der Stoffproduktionen im Buchenwald. – Berichte der Schweizerischen Botanischen Gesellschaft 64: 487–493.
- Murach D. 1984: Die Reaktion der Feinwurzeln von Fichten (*Picea abies* Karst.) auf zunehmende Bodenversauerung. – Göttinger Bodenkundliche Berichte 77: 1–126.
- Nebe W. & Herrmann U.J. 1987: Das Ökologische Messfeld der Sektion Forstwirtschaft der TU Dresden. VI. Zur Verteilung der Nährelemente in der oberirdischen Dendromasse eines 100jährigen Fichtenbaumholzes. – Wissenschaftliche Zeitschrift der Technischen Universität Dresden 36: 235–241.
- Novosadová K., Kadlec J., Rehorková Š., Matoušková M., Urban J. & Pokorný R. 2023: Comparison of Rainfall Partitioning and Estimation of the Utilisation of Available Water in a Monoculture Beech Forest and a Mixed Beech-Oak-Linden Forest. – Water 15: 285.
- Otto H.-J. 1994: Waldökologie. – UTB für Wissenschaft, Ulmer, Stuttgart, 391 pp.
- Overdieck D. 1976: Kalium-, Calcium- und Magnesium-Gehaltsschwankungen in Sonnen- und Schattenblättern bei Blutbuche (*Fagus sylvatica* L. cv. *atropunicea*) und Sonnenblume (*Helianthus annuus* L.). – Flora 165(2): 113–128.
- Packham J.R., Thomas P.A., Atkinson M.D. & Degen T. 2012: Biological Flora of the British Isles: *Fagus sylvatica*. – Journal of Ecology 100(6): 1557–1608.
- Pántosné D.T., Pántos Gy. & Vahay G.H. 1983: Néhány magyarországi erdei ökoszisztéma avartakarójának átalakulása. – Agrokémia és Talajtan 32(3–4): 365–371.
- Parton W., Silver W.L., Burke I.C., Grassens L., Harmon M.E., Currie W.S. & Fasth B. 2007: Global-scale similarities in nitrogen release patterns during long-term decomposition. – Science 315: 361–364.
- Pavlov M.B. 1972: Bioelement-Inventur von Buchen- und Fichtenbeständen in Solling. – Göttinger Bodenkundliche Berichte 25: 1–174.
- Peck A.K. 2004: Hydrometeorologische und Mikroklimatische Kennzeichen von Buchenwäldern. – Ph.D. Thesis, University of Freiburg, Freiburg, Germany, 188 pp.
- Petrișan A.M., von Lüpke B. & Petrișan I.C. 2009: Influence of light availability on growth, leaf morphology and plant architecture of beech (*Fagus sylvatica* L.), maple (*Acer pseudoplatanus* L.) and ash (*Fraxinus excelsior* L.) saplings. – European Journal of Forest Research 128: 61–74.
- Pflug E.E., Buchmann N., Siegwolf R.T.W., Schaub M., Rigling A. & Arend M. 2018: Resilient Leaf Physiological Response of European Beech (*Fagus sylvatica* L.) to Summer Drought and Drought Release. – Frontiers in Plant Science 9: 187.
- Polomski J. & Kuhn N. 1998: Wurzelsysteme. – Eidgenössische Forschungsanstalt für Wald, Schnee und Landschaft, Verlag Paul Haupt, Birmensdorf–Bern–Stuttgart–Wien, 290 pp.
- Pödör Z., Edelényi M. & Jereb L. 2014: Systematic Analysis of Time Series – CREMIT. – Infocommunications Journal 6(1): 16–21.
- Putuhen W.M. & Cordery I. 1996: Estimation of interception capacity of the forest floor – Journal of Hydrology 180: 283–299.

- Rasztovits E., Berki I., Mátyás Cs., Czimer K., Pörtzelsberger E. & Mórica N. 2014: The incorporation of extreme drought events improves models for beech persistence at its distribution limit. – *Annals of Forest Science* 71:(2) 201–210.
- Rennenberg H., Seiler W., Matyssek R., Gessler A. & Kreuzwieser J. 2004: Die Buche (*Fagus sylvatica* L.) – ein Waldbaum ohne Zukunft im südlichen Mitteleuropa? – *Allgemeine Forst- und Jagdzeitung* 175: 210–224.
- Rennie P.J. 1955: The uptake of nutrients by mature forest growth. – *Plant and Soil* 7: 49–95.
- Röhrig E. & Bartsch N. 1992: Waldbau auf ökologischer Grundlage. 6. Auflage. – Parey, Hamburg–Berlin, 350 pp.
- Röhrig E., Bartels H., Gussone H.-A. & Ulrich B. 1978: Untersuchungen zur natürlichen Verjüngung der Buche (*Fagus sylvatica*). – *Forstwissenschaftliches Centralblatt* 97: 121–131.
- Rubner K. & Reinhold F. 1960: Die pflanzengeographischen Grundlagen des Waldbaus. 5. Auflage. – Neumann Verlag, Radebeul und Berlin, 583 pp.
- Rubner K. (Hrsg.) 1934: Die pflanzengeographischen Grundlagen des Waldbaus. Dritte Auflage. – Verlag J. Neumann-Neudamm, Berlin, 597 pp.
- Rzeznik Z. & Nebe W. 1987: Wachstum und Ernährung von Buchen-Provenienzen. – *Beiträge für die Forstwirtschaft* 21(3): 106–111.
- Salamon-Albert É., Lőrincz P., Pauler G., Bartha D. & Horváth F. 2016: Drought Stress Distribution Responses of Continental Beech Forests at their Xeric Edge in Central Europe. – *Forests* 7(12): 298.
- Santonja M., Fernandez C., Proffit M., Gers Ch., Gauquelin Th., Reiter I.M., Cramer W. & Baldy V. 2017: Plant litter mixture partly mitigates the negative effects of extended drought on soil biota and litter decomposition in a Mediterranean oak forest. – *Journal of Ecology* 105: 801–815.
- Scharnweber T., Manthey M., Criegee C., Bauwe A., Schröder C. & Wilmkin M. 2011: Drought matters – Declining precipitation influences growth of *Fagus sylvatica* L. and *Quercus robur* L. in north-eastern Germany. – *Forest Ecology and Management* 262: 947–961.
- Schmitt U., Möller R. & Eckstein D. 2000: Seasonal wood formation dynamics of beech (*Fagus sylvatica* L.) and black locust (*Robinia pseudoacacia* L.) as determined by the „pinning” technique. – *Angewandte Botanik* 74(1–2): 10–16.
- Schulz H., Härtling S. & Stange C.F. 2011: Species-specific differences in nitrogen uptake and utilization by six European tree species. – *Journal of Plant Nutrition and Soil Science* 174: 28–37.
- Schulze E.D. 1970: Der CO₂-Gaswechsel der Buche (*Fagus sylvatica* L.) in Abhängigkeit von den Klimafaktoren im Freiland. – *Flora* 159(1–2): 177–232.
- Schwärzel K., Ebermann S. & Schalling N. 2012: Evidence of double-funneling effect of beech trees by visualization of flow pathways using dye tracer. – *Journal of Hydrology* 470–471: 184–192.
- Simon J., Dannenmann M., Gasche R., Holst J., Mayer H., Papen H. & Rennenberg H. 2011: Competition for nitrogen between adult European beech and its offspring is reduced by avoidance strategy. – *Forest Ecology and Management* 262: 105–114.
- Solymos R. 2009: A klímaváltozás hatása az erdők fanövedékére. – „Klíma-21” Füzetek 56: 43–47.
- Somogyi Z. 2008a: A hazai erdők üvegházhatású gáz leltára az IPCC módszertana szerint. – *Erdészeti Kutatások* 92: 145–162.
- Somogyi Z. 2008b: Recent trends of tree growth in relation to climate change in Hungary. – *Acta Silvatica et Lignaria Hungarica* 4: 17–27.
- Somogyi Z. 2009: A klíma, a klímaváltozás és a fanövekedés néhány összefüggése. – „Klíma-21” Füzetek 56: 48–56.
- Sopp L. & Kolozs L. 2013: Fatömegszámítási táblázatok. Negyedik kiadás. – Nemzeti Élelmiszerlánc-biztonsági Hivatal Erdészeti Igazgatóság, Budapest, pp. 31–32.
- Stienen H., Brankhausen R., Schaub H. & Bauch J. 1984: Mikroskopische und röntgenenergiedispersive Untersuchungen an Feinwurzeln gesunder und erkrankter Fichten (*Picea abies* [L.] Karst.) verschiedener Standorte. – *Forstwissenschaftliches Centralblatt* 103: 262–274.
- Stoelken G., Simon J., Ehrling B. & Rennenberg H. 2010: The presence of amino acids affects inorganic N uptake in non-mycorrhizal seedlings of European beech (*Fagus sylvatica*). – *Tree Physiology* 30: 1–11.
- Stojanović D.B., Kržič A., Matović B., Orlović S. ... Stojnić S. 2013: Prediction of the European beech (*Fagus sylvatica* L.) xeric limit using a regional climate model: An example from southeast Europe. – *Agricultural and Forest Meteorology* 176(4): 94–103.
- Strullu D.G., Harley J.L., Gourret J.P. & Garrec J.P. 1982: Ultra-structure and microanalysis of the polyphosphate granules of the ectomycorrhizas of *Fagus sylvatica*. – *New Phytologist* 92: 417–423.
- Szabados I. 2004: A kocsánytalantölgy évgűrűszélessége és a különféle csapadékösszegek kapcsolata. – *Erdészeti Kutatások* 91: 19–25.

- Szabados I. 2006: The effect of the precipitation on the tree ring width. – Carpathian Journal of Earth and Environmental Sciences 1(2): 39–44.
- Szafer W. 1966: The vegetation of Poland. – Pergamon Press and Polish Scientific Publishers, Oxford and Warsaw, 738 pp.
- Tarasiuk S. 1992: Recent antropogenous distribution of European beech outside its natural range in Poland. – Folia Forestalia Polonica A34: 32–38.
- Tognetti R., Johnson J.D. & Michelozzi M. 2006: Ecophysiological responses of *Fagus sylvatica* seedlings to changing light conditions. I. Interactions between photosynthetic acclimation and photoinhibition during simulated canopy gap formation. – Physiologia Plantarum 101(1): 115–123.
- Tölgyesi Gy. 1965: Adatok az erdei fák és cserjék Ca-, P-, Fe-, Mn-, Zn- és Cu-tartalmáról. – Az Erdő 14(6): 275–281.
- Tölgyesi Gy., Csapody I. & Bencze L. 1968: Savanyú ösközeten és lajtamész alapközeten nőtt fás- és lágyszárú növények hamuösszetevőinek vizsgálata. – Agrokémia és Talajtan 17(3): 225–236.
- Tranquillini W. 1992: Stoffproduktionsbilanz in Waldbeständen. In: Lyr H., Fiedler H.-J. & Tranquillini W. (Hrsg.): Physiologie und Ökologie der Gehölze. – Gustav Fischer Verlag, Jena–Stuttgart, pp. 248–254.
- Traser Gy. 1996: A fatest lebontása. In: Mátyás Cs.: Erdészeti ökológia. – Mezőgazda Kiadó, Budapest, pp. 229–231.
- Ujváriné Jármay É., Járó Z. & Ujvári F. 2001: A biomassza mennyisége, megoszlása és változatossága a nemzetközi lucfenyő származási kísérletben (IUFRO 1964/68). – Erdészeti Kutatások 90: 49–64.
- Ulrich B. 1972: Betriebswirtschaftliche Konsequenzen von Eingriffen in den Nährstoffhaushalt von Wald-Ökosystemen. – Forstarchiv 43: 129–132.
- Ulrich B., Mayer R. & Sommer U. 1975: Rückwirkungen der Wirtschaftsführung über den Nährstoffhaushalt auf die Leistungsfähigkeit der Standorte. – Forstarchiv 46: 5–8.
- van der Werf G.W., Sass-Klaassen U.G.W. & Mohren G.M.J. 2007: The impact of the 2003 summer drought on the intra-annual growth pattern of beech (*Fagus sylvatica* L.) and oak (*Quercus robur* L.) on a dry site in The Netherlands. – Dendrochronologia 25(2): 103–112.
- Varga L. 1962: Az erdei alom bomlásáról. – Az Erdő 11(2): 84–87.
- Verstraeten W.W., Muys B., Feyen J., Veroustraete F., Minnaert M., Meiresonne L. & de Schrijver A. 2005: Comparative analysis of the actual evapotranspiration of Flemish forest and cropland, using the soil water balance model WAVE. – Hydrology and Earth System Sciences Discussions, European Geosciences Union 9(3): 225–241.
- Vig P. 2002: A klimatikus változások hatásai egy középkorú bükkös vízháztartására. – Doktori (PhD.) értekezés, Debrecen, 150 pp.
- Vig P. 2004: A tényleges evapotranszpiráció számítása faállományban a SVERDRUP módszer segítségével. – Földtudományi Tanulmányok, Tiszteletkötet Dr. Justyák János 75. születésnapjára, pp. 243–249.
- Vig P. 2009: Az inszoláció változásainak hatása az erdők vízháztartására. – „Klíma-21” Füzetek 57: 83–90.
- Voigt G.K. 1962: The role of carbon dioxide in soil. In: Kozłowski T.T. (ed.): Tree growth. – The Ronald Press, New York, pp. 205–220.
- Warren C.R., Low M., Matyssek R. & Tausz M. 2007: Internal conductance to CO₂ transfer of adult *Fagus sylvatica*: variation between sun and shade leaves and due to free-air ozone fumigation. – Environmental and Experimental Botany 59: 130–138.
- Zagyvainé Kiss K.A., Kalicz P. & Gribovszki Z. 2013: Az erdei avar tömege és víztartó képessége közötti összefüggés. – Erdészettudományi Közlemények 3: 79–88.
- Zagyvainé Kiss K.A., Kalicz P., Csáfordi P. & Gribovszki Z. 2014: Forest Litter Interception Model for a Sessile Oak Forest. – Acta Silvatica & Lignaria Hungarica 10: 91–101.
- Zhang D., Hui D., Luo Y. & Zhou G. 2008: Rates of litter decomposition in terrestrial ecosystems: global patterns and controlling factors. – Journal of Plant Ecology 1: 85–93.